

ピッチ認識を支える脳内神経基盤の解明

著者	王 凱
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	11301甲第16602号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00096771

ピッチ認識を支える脳内神経基盤の解明

東北大学大学院医学系研究科医科学専攻

加齢脳科学研究部門脳機能開発研究分野

B1MD5119 王凱

目次

1.	要約	4
2.	研究背景	6
2.1	ミッシングファンダメンタルピッチ研究の歴史	6
2.1.1	ピッチの定義	6
2.1.2	ピッチの定義についての反論とミッシングファンダメンタルピッチの発見	8
2.1.2.1	周波数説	8
2.1.2.2	周期説	9
2.1.2.3	ミッシングファンダメンタルピッチの発見	9
2.2	これまでのピッチ認知センターの報告	10
2.2.1	起源と左右大脳半球差	10
2.2.2	先行研究の問題点と本研究の仮説	11
2.2.3	本研究の目的	14
3.	研究方法	15
3.1	予備心理実験	15
3.2	MRI 撮影	17
3.3	脳磁図実験	18
4.	研究結果	22
4.1	心理実験結果	22

4.2	脳磁図実験結果	24
4.2.1	N100m の聴覚誘発反応	24
4.2.2	統計結果	25
4.2.3	N100m と音楽経験の関係	26
5.	考察	27
5.1	性差・音楽経験の有無とピッチ判断の performance	27
5.2	脳活動の左右差	28
5.3	聴覚誘発反応とピッチ処理	30
5.4	ヘシュル回・側頭平面とピッチセンター	33
6.	結論	37
7.	謝辞	38
8.	参考文献	39
9.	図	56
10.	表	72

1. 要約

大脳において、音のピッチを認知処理する「ピッチ処理センター」は、聴覚皮質のヘシュル回（Heschl's gyrus）および側頭平面（planum temporale）に存在することが報告されている。しかし、ピッチ処理が、大脳半球の左右どちらで優位に行われているのかは、諸説あり、いまだに明らかになっていない。心理音声学の研究では、健常人は、音を認知する際に、音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者、あるいはどちらにも属さない者に分類できている。すなわち、音の聞き取り能力が異なる二つのタイプと、どちらにも属さないタイプでは、異なったピッチ処理センターを持っている可能性が示唆される。

自然環境下では、雑音によりファンダメンタルピッチ、さらには2倍音、3倍音がマスクされることがある。または、人工的に低域カットフィルタにより削除されることがある。しかし、マスクあるいは削除された音が物理的に存在しないにも関わらず聞き取れることがある。これをミッシングファンダメンタル現象と呼ぶ。この能力は必ずしも皆が有するものではない。音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者のみが、ミッシングファンダメンタルを認知することができる。本研究では、ファンダメンタルの認知能力を有する群とハーモニクス成分の認知能力を有する群について、ピッチ処理に関わる聴覚誘発反応 N100m の脳活動を、脳磁図（magnetoencephalography, MEG）により計測をした。

精神疾患、聴覚疾患、頭部外傷の既往のない、東北大学の日本語母語話者、健康な右利き大学生、もしくは大学院生 169 名を対象とした。すべての被験者に実験の目的、安全性について説明を行い、書面による同意を得た。本研究のプロトコルは、東北大学医学部・大学院医学系研究科倫理委員会の承認を得ている。最初に、ミッシングファンダメンタルピッチ判断課題を行い、ファンダメンタル認知能力を有する群とハーモニクス成分認知能力を有する群に分離した。その中から、9 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者と、9 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者を抜粋し、脳磁図を用いて、二つの群の N100m 反応を計測した。

ファンダメンタルの認知能力が強い被験者は、左大脳半球と比較し、右大脳半球の N100m 信号強度が大きく ($p < 0.0001$; ANOVA)、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は、右大脳半球と比較し左大脳半球の N100m 信号強度が大きい ($p < 0.0001$) ことを発見した。また、N100m の脳活動の起源はヘシュル回もしくは側頭平面に推定された。以上より、ピッチ認知処理センターは右大脳半球のヘシュル回と側頭平面に存在し、左大脳半球のヘシュル回と側頭平面はハーモニクス成分の認知処理センターであることを明らかにした。

本研究の将来への応用としては、音楽治療 (music therapy) への応用が考えられる。音楽療法は、先天の神経発達異常及び後天の事故より生じた認知障害のリハビリテーションに効果があるが、同じ障害を持っている全ての患者さんに効果があるわけではない。本研究の知見より、人間の音の認知の脳内情報処理メカニズムは、ピッチ

認知とハーモニクス認知メカニズムの二つがあり、患者さんの音を認知する特徴より、最適な音調或は音色が豊富の音楽刺激訓練法を開発するなどへの貢献が期待される。

2. 研究背景

2.1 ミッシングファンダメンタルピッチ研究の歴史

2.1.1 ピッチの定義

単一の周波数（single frequency）からなる物理音を、ピュアトーン（pure tone）と定義する。人間はこの客観的な物理音を感知し、主観的な音の高さを感じることができる。即ちピッチ（pitch）である¹⁻³⁾。Georg Simon Ohm（1789-1854）は、初めてピッチを定量的に定義し、 $p = \sin(2\pi ft + \varphi)$ という数式で表現した。ある周波数 f に対応するピッチ p は、その f の正弦波成分 $\sin(2\pi ft + \varphi)$ と同値であるとした¹⁻³⁾。

自然界に存在する音は、ほとんどピュアトーンではなく、様々な周波数を含んでいる。例えば、ギターの音はその一つである。ギターの弦は先ず全長で振動する。この時、ある周波数 A （Hz）を生じる。次に、弦は全長の二分の一で振動し、この時に出て来る周波数は、全長振動からの周波数 A （Hz）の二倍になる。即ち、 $2A$ （Hz）である。このように、弦は、三分の一、四分の一といった順番で振動し、それぞれの周

波数は、全長振動からの周波数 A (Hz) の三倍、四倍になる。即ち、 $3A$ (Hz)、 $4A$ (Hz) となる。その最初の周波数、つまり、全長振動からの基本波 A (Hz) は、ファンダメンタル (fundamental) であり、その整数倍の波数を持った高調波は、ハーモニクス成分 (harmonic components) である^{4,6)}。

日常的に耳にする人間と動物の声や楽器の音は、このような複数の周波数成分から構成されている複合音 (complex tone) である。しかし、複合音を聞く際には、それぞれのピュアトーンを分離して聞くのではなく、融合的な音として感知する^{5,7)}。1843年、Ohm^{1,3,7)}は複合音より感知するピッチは、その中のファンダメンタルと同じであることを報告した^{5,6)}。これは、ジョゼフ・フーリエ (1768-1830) が、「ほとんどすべての関数は、正弦波の重ね合わせで表現できる」と主張し、「フーリエ級数展開」を発表した功績による。このフーリエ解析の理論を用い Ohm は、複合音の中の成分を分解、分解した全ての周波数成分の振幅と数量を観測し、複合音の中のファンダメンタルの振幅が一番大きいことを発見し、「調波複合音のピッチは、その中のファンダメンタルで決定される」と報告した^{1,8,9-11)}。さらに Ohm は、その発見に基づき、「複合音の音色は、高調波らの数量と振幅強度によって決まり、その位相は関係しない」と定義し^{1,12,13)}、オームの音響法則 (Ohm's acoustic law) を報告した。

19 世紀は、人間の聴覚システムの解剖学的な知見はほとんどなく、実験的な検証も困難であったが、Ohm は、「調波複合音にピッチを感知することより、人間の聴覚システムはフーリエ分析の能力を持つ」と主張した^{1,2,11)}。またその時期に、オームは

音響法則として、「複合音の中のある周波数のピュアトーンのピッチを聞くことができるなら、その周波数は存在しないといけない」と主張した^{1,3,7-11,14,15)}。

2.1.2 ピッチの定義についての反論とミッシングファンダメンタルピッチの 発見

2.1.2.1 周波数説

Ohm がピッチを定義する約 200 年前に、ピッチは「周波数」から生じるものであると考えられていた。1636 年、Marin Mersenne (1588-1648) は、「Harmonie universelle」の中で、「弦から鳴り響く音の中に、同時に五種類以上の音がある。第一は弦自身の原本な音であり、他は第一より生じた音である (the string struck and sounded freely makes at least five sounds at the same time, the first of which is the natural sound of the string and serves as the foundation for the rest ...)」と主張した^{3,16)}。1704 年、Joseph Sauveur (1653-1716) は、振動の弦から生じた音の中のファンダメンタルとハーモニク成分を発見し、初めて「fundamental sound」と「harmonic sound」という二つの用語を提案した⁴⁾。しかし、数学による解析技術を用いた解釈がないため、どのような周波数成分があるか、周波数の間の位相関係はどのようなものなのか、については明らかにされなかったが、基本的にその当時の科学

者は、「周波数」は音の本質であると考えられていた³⁾。

2.1.2.2 周期説

1841 年、August Ludwig Friedrich Wilhelm Seebeck (1805-1849) は、周期の観点からピッチを考察した。Seebeck は、ディスクにある半径 R の同心円のトラックに、一定な距離（例えば、弧の長さ \hat{a} ）で直径が \hat{a} より短いホールを複数作成した。このディスクが一定な角速度 ω で回っている時に、気流を垂直に同心円のトラックの上から吹かせた。その目的は、等距離のホールによって、気流をある周期で通過・阻止させることである。Seebeck が作ったディスクを **Siren disk** と言う^{7,17)} (図 1)。ディスク音の中のピッチは、一秒につき気流が通過したホールの数量より作られたものであり、単位時間内に通過するホールの数量とピッチの高さは正相関であるため (図 2)、Seebeck は、ピッチは周期的なものであるという観点で、「周期的な気圧パルスは、ピッチを引き起こす」と報告した^{7,17)}。

2.1.2.3 ミッシングファンダメンタルピッチの発見

Seebeck は、同じやり方で、**Siren disk** のトラックに、弧の長さが \hat{a} 、 \hat{b} 、 \hat{a} 、 \hat{b} という二つの距離でのホールをいくつか連続して作成した (図 3、左)。弧の長さは \hat{a}

と \hat{b} で作ったディスクからの気圧パルスは不規則的であるが、人の聴覚器官は、この一つの不規則的なパルスを、二つの規則的なパルスが存在するように分析できる、と報告した。また、この不規則的なパルスからの音の中にあるピッチは、弧の長さ $\hat{a} + \hat{b}$ で作ったディスク（図 3、右）からのピッチと同じものとして聞こえた^{7,17)}。

例えば、弧の長さ \hat{a} と \hat{b} という二つの距離で連続して作成した気圧パルスから、別々に 300Hz と 200Hz の音が聞こえ、さらに 100Hz の音も聞こえる。弧の長さ $\hat{a} + \hat{b}$ という一定な距離で作った気圧パルスからも 100Hz の音が聞こえる。

Seebeck は、 \hat{a} と \hat{b} の弧の長さで作成した Siren disk から、ある隠れたピッチが聞こえることを発見した。しかし、Seebeck は、その隠れたピッチという現象を解釈できず、この現象を報告しただけであった^{7,17)}。その後、この現象に対する用語は、periodicity pitch、pitch of residue、あるいは the problem of the missing fundamental と報告され^{2,18-22)}、現在はミッシングファンダメンタルピッチ (missing fundamental pitch) と命名されている^{5,6)}。

2.2 これまでのピッチ認知センターの報告

2.2.1 起源と左右大脳半球差

先行研究では、人間の脳内におけるピッチを認知する場所は一致していない。機能

的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) により、ピッチを聞く時に、側頭平面 (planum temporal, PT)²³⁻²⁸⁾ とヘシュル回 (Heschl's gyrus, HG)²⁴⁻³³⁾ に脳活動があったとする報告がある。また、脳磁図での研究でも同様に、ピッチ認知によって引き起こされた磁場の起源が、側頭平面³⁴⁻³⁶⁾ とヘシュル回^{35,37-40)} であるとする報告がある。また、先行研究で報告されたピッチ認知の左右大脳半球差の結果も一致していない。右半球がピッチ認知優位半球とする報告^{29,41,22,37,42)}、さらに左半球優位⁴³⁻⁵⁰⁾ とする報告もある。

最近の fMRI の研究結果では、ピッチ認知センターの場所には、大きな個人差があるとする報告がなされている。16 人の被験者のピッチ認知から引き起こされた脳活動において、6 人は左半球のヘシュル回と側頭平面が活動し、7 人は右半球の側頭平面と外側ヘシュル回 (lateral HG, LHG) が活動した、と報告されている³²⁾。

2.2.2 先行研究の問題点と本研究の仮説

ピッチ認知処理に関する左右大脳半球の機能差は確立されていない。心理音声学の研究 (psychoacoustic studies) より、健常人が音を認知する際、音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者、あるいはどちらにも属さない者に分類できるとされている^{8,51-53)}。音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者では、それぞれの脳

内におけるピッチ処理基盤が異なる可能性が示唆される。ファンダメンタルピッチを聞き取る能力者は、**fundamental pitch (f_0) listener** と定義され、ハーモニクス成分を聞き取る能力者は、**spectral pitch (f_{sp}) listener** と定義される。

自然環境下では、雑音によりピッチ、さらには 2 倍音、3 倍音がマスクされることがある。人工的にも低域カットフィルタにより削除することができる。しかし、マスクあるいは削除された音が物理的に存在しないにも関わらず聞き取れることがある^{20,54-57})。これをミッシングファンダメンタルと呼び、その能力は、音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者にのみ存在する。すなわち、ミッシングファンダメンタルの聞き取り能力は、皆が有するものではない。

2005 年 Schneider ら⁴⁵⁾は、420 名の被験者にミッシングファンダメンタルピッチを判断させた心理実験を行い、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者、弱い被験者、及び、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者、弱い被験者に分類されることを示した。420 名の被験者の中には、プロフェッショナル音楽者、アマチュア音楽者、及び非音楽者を含んでいたが、ファンダメンタル、ハーモニクス成分の二つの認知能力と音楽経験には有意な関連はないと報告した⁴⁵⁾。

また、この先行研究では、**MRI** と脳磁図を用い、**MRI** では、脳の灰白質の体積の評価をし、ファンダメンタルの認知能力を有する群では、左の外側ヘシュル回が大きいこと、ハーモニクス成分の認知能力を有する群では、右の外側ヘシュル回が大きいことを報告した。脳磁図では **P30m** と **N100m** 反応では二つの群の差がないこと、

P50m でファンダメンタルの認知能力を有する群の左半球の振幅が大きく、ハーモニクス成分の認知能力を有する群の右半球の振幅が大きいことを報告した⁴⁵⁾。

N100m にファンダメンタルとハーモニクス群の間で差がないとの結果からは、音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者で、それぞれの脳内におけるピッチ処理基盤は同一である可能性が示唆される。

しかし、Schneider ら⁴⁵⁾の脳磁図実験に参加した被験者には、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者だけではなく、ミッシングファンダメンタルピッチの判断が偶然におこる確率に近い被験者も含まれ、二つの群の N100m の脳活動の明らかな差が得られなかった可能性は否定できない。

N100m が示す脳活動は、非周期的刺激音に比べ、周期的刺激音によって誘発された反応がより高振幅であることから^{58,59)}、ピッチ認知と関係があると考えられている^{36,60-62)}。また、音の認知に関する先行研究では、ピッチ認知、ファンダメンタルの認知は右半球優位であり^{22,37,63)}、音色、ハーモニクスなどの高調波の処理に関しては、左半球の役割である^{37,63,64)}との報告もある。すなわち、ピッチ認知とハーモニクス認知の脳内情報処理メカニズムは異なると考えられる。よって、音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者では、N100m の活動が異なる可能性が示唆される。

さらに、P50m が示す脳活動は、感覚ゲーティング (Sensory gating) と関係がある⁶⁵⁻⁶⁸⁾。また、刺激音の種類に関わらず^{65,68)}、刺激に注意する程度だけで左右され、

全ての刺激により誘発できるわけではない⁶⁹⁻⁷¹⁾。従って、**P50m** の脳活動がピッチ及びハーモニクス認知処理と関係ない可能性がある。

一方、右半球のヘシュル回を切除した患者さんの場合だけ、ミッシングファンダメンタルピッチの認知機能が失われ²²⁾、純音の区別閾値が大きくなる⁷²⁾との臨床研究の報告があり、**Schneider** ら⁴⁵⁾の脳形態研究における外側ヘシュル回の皮質体積の左右差の結果とは矛盾する。

本研究では、音のファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者で、それぞれの脳内におけるピッチ処理基盤は異なり、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の **N100m** は右半球が優位であり、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は左半球が優位であるとの仮説を、ファンダメンタルピッチを聞くことができる群と、ハーモニクスに注目してファンダメンタルピッチが聞こえない群のミッシングファンダメンタルの刺激音を認知する際の脳活動を、脳磁図を用いて計測することにより検証することとした。

2.2.3 本研究の目的

聴覚誘発脳磁界反応 **N100m** の信号源はヘシュル回と側頭平面からの複合波と考えられている^{35,36)}。本研究は、脳磁図を用いて、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者と、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者の、ピッチ処理時のヘシュル回と

側頭平面の左右大脳半球の機能差の有無を明らかにすることより、人間のピッチ認知メカニズムとハーモニクス認知のメカニズムの差異を明らかに解明することが目的である。

3. 研究方法

3.1 予備心理実験

脳磁図実験に先立ち、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者を分離・選抜する必要がある。そこで、本研究は、Schneiderら（2005 年）⁴⁵⁾のミッシングファンダメンタルピッチ判断の心理実験を参照し、ファンダメンタルの認知能力とハーモニクス成分の認知能力を評価するインデックスとなるミッシングファンダメンタルピッチ判断課題を製作した。

精神疾患かつ聴覚疾患や頭部外傷の既往のない、東北大学に在学している日本語母語話者、健康な右利き大学生、もしくは大学院生 169 名（21.47 歳 \pm 1.75：平均 \pm 標準偏差、範囲 20～30 歳、男性 103 名、女性 63 名）が心理実験に参加した。利き腕の判定には、エジンバラ式利き腕検査を用いた⁷³⁾。

全ての被験者は、プロフェッショナル音楽者ではない。一部の被験者（97 名）は、学校音楽教育で得られた音楽経験だけではなく、それ以外の音楽教育も受け、一つあ

るいは一つ以上の楽器を演奏できる。

本研究はヘルシンキ宣言に準拠し、また、事前に東北大学医学部・大学院医学系研究科倫理委員会の承認を得た。被験者全員に対して、書面および口頭で、研究の目的、方法、危険性等を事前に説明し、書面による同意を得た。

心理実験では、二つの音を聞かせ、ピッチの認識ができるかどうかを評価した。具体的には、ピッチの高低とハーモニクスの高低をコントロールし、図4のようにピッチが低いがハーモニクスは高いといった複合音刺激を提示し、その高低を回答させた。図4の例では、音1のピッチは音2のピッチよりも高いが、ハーモニクスは逆になる。よって、音1と音2を聞いて、音1が高いと答えた被験者はピッチの認識ができたことになり、逆に音2が高いと答えた被験者は、ピッチ認識ができなく、ハーモニクスを認知することになる。

全ての心理実験用音声刺激は、音声刺激作成用ソフト（Steinberg Cubase 7 software）を用いて製作した。音の再生ソフトは、Foobar2000 software を用い、心理実験用 EPSON 製コンピューターと SONY 製モニターヘッドフォン（SONY monitor headphone MDR-CD900ST）を使って提示した。刺激音の統制のため、人工耳とデシベル計（Brüel and Kjaer type 4153 artificial ear, Brüel and Kjaer Pressure-field 1/2" Microphone Type 4192, Brüel and Kjaer Falcon Range 1/2" Microphone Preamplifier Type 2669 and Brüel and Kjaer Pistonphone type 4220）で、音量の計測を行い、刺激音を調整した。ヘッドフォンからの音の音量は、65 dB

sound pressure level (dB SPL) とした。

実験では、144 個のトーンペアを作成した（表 1 と表 2）。複合音の持続時間を 500 ミリ秒、うち、音の立ち上がり時間、立ち下がり時間は 10 ミリ秒である。トーンペアの中の二つの複合音の間の刺激間隔時間（inter-stimulus interval, ISI）は 10 ミリ秒である。各々のトーンペアを両耳に提示した。二つのトーンペアの間の刺激時間間隔は 250 ミリ秒であった。また、次の新しいトーンペアを再生する前に、2 秒間のピッチ判断時間を設定した。

ミッシングファンダメンタル評価課題では、下記のインデックスを用いて評価を行った。

$$\delta_p = \frac{(\text{ハーモニクスが高いと評価した試行数} - \text{ピッチが高いと評価した試行数})}{(\text{ハーモニクスが高いと評価した試行数} + \text{ピッチが高いと評価した試行数})}$$

$\delta_p = -1$ を完全なファンダメンタルの認知能力あり、 $\delta_p = 1$ を完全なハーモニクス成分の認知能力ありと評価した。また、 $\delta_p < -0.5$ を強いファンダメンタルの認知能力あり、 $\delta_p > 0.5$ を強いハーモニクス成分の認知能力ありと評価した。

3.2 MRI 撮影

後述する結果に示したように、心理実験により、34 名の被験者が強いファンダメ

ンタルの認知能力あり、30名の被験者が強いハーモニクス成分の認知能力ありと判定できた。そのうち、それぞれ16名の被験者が、脳磁図実験に参加することを承諾した。

脳磁図実験に参加する被験者の、頭部MRI撮影をおこなった。MRI撮像は、東北大学加齢医学研究所脳磁図検査室に隣接するMRI検査室にて撮影した。超高磁場MRI（フィリップス社製・アチーバ 3.0T）を用いた脳解剖画像の撮影を行った。高分解能T1強調画像（T1WIs）を撮像マトリックス 240×240 、エコー時間(echo time; TE) 3ms、撮像面範囲(Field of view; FOV) 24 cm、スライス厚 1.0mm、スライス 162 スキャン、6.5ms の繰り返し時間(repetition time; TR)により、3D のグラジエントエコーシーケンス(Magnetization-Prepared Rapid Gradient-Echo; MPRAGE) 法で全脳を撮像した。

3.3 脳磁図実験

脳磁図計測は、全頭型脳磁計測システム（横河電機社製 PQA160C 200 チャンネル）を用いた。計測方法は、脳磁図機器にプレインストールされている計測シーケンスを用い、脳の神経活動に伴い発生する N100m の聴覚誘発反応を、0.16 ~ 100 Hz でバンドパスフィルタ (band-pass filter) した後、1000 Hz のサンプル周波数で記録した。データ解析には、等価電流双極子推定法や、脳機能解析ソフトウェア

Meglabratory 等を用いて行った。脳磁図で求められた解析結果は、3D-MR 画像と統合することにより機能と画像をもって最終評価とした。なお、脳磁図計測時間は準備を含め約 2 時間である。

16 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者と 16 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者が実験に参加した（表 5）。被験者は磁気シールドルーム内に移動し、イヤホンを着用し仰臥位で脳磁図機械に頭部を挿入した。

脳磁図実験で用いた全ての音刺激は、音刺激作成用ソフト（Steinberg Cubase 7 software）を用いて製作した。刺激提示、及び刺激のトリガーシグナル生成には、脳機能実験用ソフトウェア Presentation（Neurobehavioral Systems 社製）を用いた。刺激の再生については、磁気シールドルームに外部磁場からの干渉を避けるため、脳磁図専用スピーカ（ER-3A; Etymotic Research, Elk Grove Village, IL）と繋げるプラスチックチューブ（長さ、1.5 m）を用いたイヤホンで、刺激を再生し、両耳に提示した。

N100m の脳活動を引き起こす刺激音は、931 Hz, 798 Hz, 665 Hz の複合音からなる音のみを使った。この音は、心理実験の結果、最もミッシングファンダメンタルの認知能力者とハーモニクス成分の認知者の弁別が良い音であることから、脳磁図実験に採用した。刺激音の長さは、500 ミリ秒であり、その中に、音の始まりと終わりに、別々で 10 ミリ秒の立ち上がり立ち下がりがあった⁴⁵⁾。被験者は、脳磁図撮像中に 200 回、音を聴取した。音の間の刺激時間間隔は 1.8 ~ 2.2 秒であり、刺激音の音量

は、80 dB sound pressure level (dB SPL) であった。

被験者は、脳磁図時に前額部に五ヵ所のマーカーコイルを装着し（左耳、右耳、前額左、前額中、前額右）、コイルに通電することで頭部位置とセンサーの位置関係を計測した。また、光学的位置計測装置 (FastSCAN Cobra, Polhemus Inc., Colchester, VT) を用いて、コイルと頭部位置を計測した。MRI と脳磁図撮像データは解析ソフトウェア Meglaboratory (MEG160) (横河電機株式会社) を使用し、MRI による解剖学的な T1 画像データにコイル位置 (RPA; Right Preauricular、LPA; Left Preauricular、NASION) の座標を指定し、デジタイザーによるデータと座標及び頭部形状の位置合わせをした。(図 5) ⁷⁴⁾。

覚醒度が低下すると N100m の脳活動の振幅も下がるため ^{75,76)}、磁気シールドルーム内に設置したディスプレイにクロスマークを提示し、これを凝視しながら、開眼状態で音を聴取することに集中するように指示をした。疲労を感じた場合は、声で意思表示をしてもらい、休憩を入れた。また、脳磁図計測中に、ディスプレイで映したアルファ波を監視し、後頭部のアルファ波の連続性が乏しくなり、周波数も平均 10Hz (範囲 8 ~ 13Hz) より遅くなり、振幅が低下するなどの、明らかな覚醒度の低下のサインが出た場合には、実験を中断して被験者に休憩をさせる場合もあった(16名)。

本実験に目的とする N100m の聴覚誘発反応を得る為、トリガーで記録した刺激音のオンセットの前の 100 ミリ秒から、後の 500 ミリ秒までの間のデータを、加算平均した。刺激音のオンセットの前のベースラインは、オンセットの前の 100 ~ 50 ミ

り秒であった。音の刺激回数は 200 回であったが、被験者の覚醒度が下がってしまった時間帯があったこと、外部雑音が多い場合があったことより、実際に加算平均できた回数は、被験者によりばらつきがあり、50～200 回（50 回：10 半球、100 回：14 半球、200 回：12 半球、平均±標準偏差：119.4 回±60.4）であった。先行研究では、N100m の聴覚誘発反応を、加算回数 32 回⁶¹⁾、50 回^{77,78)}で計測しているので、本研究の加算回数は妥当であると考えている。

フィルタリングにより、目的とする周波数帯域 1.0～40.0 Hz のデータを解析した。刺激音のオンセットよりの 70～110 ミリ秒の間に現れた反応より、N100m の等磁場図を作成し、電流双極子の位置及び電流の流れ方向を計算した。

電流双極子の推定は、Sarvas Law⁷⁹⁾に基づいた等価電流双極子（equivalent current dipole, ECD）で行った。等価電流双極子とは、仮想的に正負等価の一对の電荷が一ヵ所に存在するものを単一等価電流双極子と称し、それが脳内にある場合に見られる等磁場図の理論的分布を双極子パターン（dipolar pattern）とするものである。この手法では、ある時点における等磁場図が、双極子パターンに近似していると判断された場合は、単一等価電流双極子を推定することができる。本研究では、適合度（goodness-of-fit values）が 90%以上だけの電流双極子の位置を有意なものと判断した。

16 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者と 16 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者それぞれでの、群内（Within）の左右半球の N100m 強度

(intensity (nAm)) の有意差と、群間 (Between) の N100m 強度の有意差を明らかに解析するため、2 要因混合の分散分析 (Mixed-design ANOVA (Between: f_0 and f_{sp} groups; Within: left and right hemisphere)) を行った。また、同じ統計手法によって、群内と群間の交互作用における有意差も検討した。

さらに、N100m の左右半球差を

$$\delta_f = \frac{(\text{左半球の N100m の強度} - \text{右半球の N100m の強度})}{(\text{左半球の N100m の強度} + \text{右半球の N100m の強度})}$$

の指数により評価を行った。この指数では、 $\delta_f < 0$ が右半球優位、 $\delta_f > 0$ が左半球優位となる。本指数 δ_f と、音楽経験 (musical aptitude) 年数の間の関係を検討する為⁵⁰⁾、スピアマンの順位相関係数 (Spearman's rank correlation) を行った。

本研究の全ての統計分析の有意差基準は、 $p < 0.05$ で設定した。

4. 研究結果

4.1 心理実験結果

169 名被験者のミッシングファンダメンタルの認知能力に関する指数 δ_p の分布を図 6 に示す。分布は Kolmogorov-Smirnov の正規性の検定で正規分布 ($p < 0.05$) を示しており、多くの被験者は、インデックス範囲 -0.5 ~ 0.5 の中、即ち、弱いファン

ダメンタルの認知能力、或は弱いハーモニクス成分の認知能力を持つことがわかった。

Schneider ら (2005) ⁴⁵⁾の心理実験の結果より、周波数が高い音では、被験者を二つの群に分離しにくいことが報告されているため、同じデータから、高い周波数を持った 48 個 トーンペア (表 2 に示した第 97 番から第 144 番まで) を除き、残りの 96 個の トーンペアで、もう一回インデックスを計算した結果を図 7 に示す。本研究では、このデータから、34 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者と 30 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者を選んだ (表 5)。MRI 撮影と脳磁図実験に参加した被験者は、それぞれ 16 名であり (表 5)、被験者のインデックスの分布を図 8 に示した。

また、心理実験で最もミッシングファンダメンタルの認知能力者とハーモニクス成分の認知者の弁別が良い音を得、脳磁図実験に採用した。具体的な選択方法は、心理実験の行動データより、ミッシングファンダメンタル トーンペアごとに対し、ファンダメンタルの認知能力を有する群の中のピッチで判断した人数の割合と、ハーモニクス成分の認知能力を有する群の中のピッチで判断した人数の割合の間の差を計算した。その差が最大の トーンペアを脳磁図実験で用いることとした (表 3 と表 4)。

被験者の性差、音楽経験の有無は、ミッシングファンダメンタルの認知 performance に有意な影響がなかった (性差 : $p = 0.46$; 音楽経験の有無 : $p = 0.17$)。

4.2 脳磁図実験結果

4.2.1 N100m の聴覚誘発反応

本実験には、16 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者と 16 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者のうち、各群 7 名の被験者のデータは、おそらく実験中の覚醒度の低下に伴い、記録した聴覚誘発反応の S/N 比が低く、電流双極子の推定が聴覚皮質でできなかった。そこで、残った 18 名（各群 9 名）（表 5）の被験者のデータを、統計分析に使った。

典型的な反応を示した 1 名の被験者の N100m の波形、磁場分布、起源の拡大図を、図 8 に示した。9 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者と 9 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者の N100m の聴覚誘発反応の波形を図 10 に、聴覚誘発反応の磁場分布を図 11 に、電流双極子の位置を、図 12 に示した。

波形を見ると、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の場合は、左半球より、右半球の振幅が大きく（図 10 左）、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は逆に、右半球より、左半球の振幅が大きい（図 10 右）傾向があることが視覚的にもわかる（統計解析に関しては後述）。

磁場分布では、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の場合は、左半球より、右半球の磁場が強く（図 11 左）、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は逆に、

右半球より、左半球の磁場が強い傾向があった（図 11 右）。

電流双極子は、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者では、大脳左半球では 6 名が側頭平面、2 名が外側ヘシュル回、1 名が中央ヘシュル回（mesial Heschl' gyrus, mHG）に、右半球では 3 名が側頭平面、3 名が外側ヘシュル回、3 名が中央ヘシュル回に推定された（図 12、表 6）。

一方、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者では、大脳左半球では 3 名が側頭平面、1 名が外側ヘシュル回、5 名が中央ヘシュル回に、右半球では 6 名が側頭平面、1 名が外側ヘシュル回、2 名が中央ヘシュル回に推定された（表 7）。

4.2.2 統計結果

表 8 と表 9 に、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者と（表 8）、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者（表 9）の、左半球と右半球それぞれの N100m の強度、左右半球の強度の差分、及び N100m の左右半球差のインデックスを示した。

群内比較の結果、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者は左半球より右半球の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が統計的に有意に大きかった（ $F_{1,17} = 40.96, p < 0.0001$ ）。ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は右半球より左半球の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が統計的に有意に大きかった（ $F_{1,17} = 11.89, p < 0.005$ ）。

群間比較の結果では、大脳左半球では、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者

より、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が統計的に有意に大きかった ($F_{1,17} = 4.37, p < 0.05$)。一方、右半球では、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者より、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が統計的に有意に大きかった ($F_{1,17} = 21.47, p < 0.0001$)。

群内と群間の交互作用の結果は、二つの群のタイプと左右半球の活動強度の交互作用に有意差があった ($F_{1,17} = 48.50, p < 0.0001$)。

4.2.3 N100m と音楽経験の関係

表 10 と表 11 に、二つの群の被験者の N100m の左右半球差を表す指数 δ_f と音楽経験年数を示した。ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の 6 名に楽器経験があり (平均 9.00 年 \pm 5.45 SD)、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者の 8 名に楽器経験 (平均 7.75 年 \pm 3.56 SD) があった。

N100m の左右半球差を表す指数 δ_f と音楽経験年数の間には、統計的に有意な相関は認められなかった (ファンダメンタルの認知能力が強い被験者 ($\rho = 0.02, p = 0.96$); ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者 ($\rho = -0.07, p = 0.86$))。

5. 考察

本研究では、音処理が個人毎で異なることを行動データおよび脳磁図を用いた脳機能の面から示した。ミッシングファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者では、ピッチ認知に関連する N100m の聴覚誘発反応が異なることを世界で初めて明らかにした。具体的には、ミッシングファンダメンタルの認知能力が強い被験者は左半球より右半球の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が大きく、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は右半球より左半球の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が大きいことを発見した。本研究の成果より、人間の音の認知の脳内情報処理メカニズムは、ピッチ認知とハーモニクス認知メカニズムの独立した二つのメカニズムがあることがわかった。

5.1 性差・音楽経験の有無とピッチ判断の performance

本研究では、被験者の性差、音楽経験の有無は、ミッシングファンダメンタルの認知 performance に有意な影響がなかった。性差に関しては、Charlton ら⁸⁰⁾は、男性 18 名と女性 37 名の英語母語話者からの心理結果より、ピッチ判断の performance は男性の方が高いと報告した。また、Cohen ら⁸¹⁾の研究では、男性 10 名と女性 10 名のフランス母語話者及び男性 10 名と女性 9 名の中国語母語話者の心理結果より、ピッチ判断の performance は女性の方が高いと報告した。これらの結果は本研究結果と矛盾するが、412 名（男女を区別していない）という大人数の被験者を用いた

Ladd ら⁸²⁾の報告では、性差がピッチ判断の performance に影響しないと報告しており、本研究結果と矛盾しない。Charlton ら⁸⁰⁾および Cohen ら⁸¹⁾の研究は被験者数が少ないことが影響した可能性があると考ええる。

音楽経験に関しては、Seither-Preisler ら⁸³⁾は、49 名（プロ 18 名、アマチュア 31 名）の音楽経験がある被験者と 30 名の音楽経験がない被験者を利用し、音楽経験の有無がピッチ判断の performance に影響すると報告した。音楽のプロは、ミッシングファンダメンタルピッチで判断し、音楽経験がない被験者はハーモニクスの方で判断している。Ladd ら⁸²⁾は、412 名の被験者（音楽者と非音楽者の人数を書いていない）を利用し、音楽経験の有無がピッチ判断の performance に影響しないと報告しており、一致した結果は得られていない。

5.2 脳活動の左右差

本研究では、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の N100m の反応は右半球が強く、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は逆に左半球が強いことを発見した。過去の研究より、音の複雑な変化を分析する、音色、ハーモニクスなどの高調波の処理に関しては、左半球の役割であり^{37,63,64)}、音の周波数成分の分析に対するのは右半球優位であると言われている^{63,84)}。今回の研究結果は、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者は、音の中の周波数成分を分析し、存在していないピッチの周波数を

計算しており、逆に、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は、音の中の周波数成分をそのまま認識するといった認知過程の違いが存在していることを示唆すると考える。

しかし、Schneider ら⁴⁵⁾の先行研究では、本研究と逆の結論が導き出されている⁴⁵⁾。彼らは、P50m の聴覚誘発反応を観察し、ファンダメンタルの認知能力を持っている被験者は左半球有意、ハーモニクス成分の認知能力を持っている被験者は右半球有意と報告した。外側ヘシュル回の灰白質にも、同様の左右差があるとしている。また、N100m に関しては、群間の有意差と群内左右半球の有意差がないとしている。

本研究と、Schneider ら⁴⁵⁾の研究の違いは、第一に、本研究では心理実験に基づき、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者のみを選んだことにある。Schneider ら⁴⁵⁾は、認知能力の偏在の弱い被験者も対象としたため、有意な群間差が出なかった可能性がある。

第二は、脳磁図実験の刺激音の選択である。本研究は、心理実験の結果、最もミッシングファンダメンタルの認知能力者とハーモニクス成分の認知能力者の弁別が良い音、931 Hz, 798 Hz, 665 Hz の複合音を、脳磁図実験に採用した。しかし、Schneider ら⁴⁵⁾の脳磁図実験では、100Hz と 500Hz の純音及び複合音を採用したことより、本研究で使用された刺激音の周波数自体と違い、異なった結果を導き出した可能性がある。

先行研究⁴²⁾では、ファンダメンタルの認知能力者とハーモニクス成分の認知能力者

に対し、純音、ファンダメンタルピッチを含んでいる複合音及びミッシングファンダメンタルの音で誘発された脳活動を比較し、ファンダメンタルの認知能力者とハーモニクス成分の認知能力者では、ミッシングファンダメンタルの音で誘発された脳活動は異なるが、純音とファンダメンタルピッチを含んでいる複合音で誘発された脳活動は同じであると報告した。本研究では、最もミッシングファンダメンタルの認知能力者とハーモニクス成分の認知能力者の弁別が良い音を用いたことにより、Schneiderらの研究⁴⁵⁾とは異なり、二つの群のそれぞれの脳内における N100m の有意な群間差が出たと考えられる。

第三は、解析方法の差異である。本研究は、被験者のデータを個人解析により単独で分析したが、Schneider ら⁴⁵⁾はグランドアベレージ (grand average) という手法で解析を行っている。グランドアベレージを用いたことにより、本研究の個人解析では SN 比が低く解析できなかった P50m の反応を抽出できた代わりに、本研究で明らかになったように N100m のような双極子の局在の個人差がある場合には信号抽出の精度が低くなると考えられる。

一方、過去の臨床研究の結果は、本研究で発見した結果をサポートしている。神経心理学研究では、音の中にピッチという成分があるかどうかを問わず、右半球の聴覚皮質が破壊されると、ピッチの認知能力が欠損することから、右半球の聴覚皮質はピッチに対する重要な役割を果たしていると報告している^{22,72,85,86)}。また、てんかんを治療する際に、右半球のヘシュル回を切除した後に、ミッシングファンダメンタルピ

ッチを認知できなくなるが、左半球のヘシュル回を切除しても、ミッシングファンダメンタルは正常に認知できるという報告²²⁾もある。

5.3 聴覚誘発反応とピッチ処理

一般的に、聴覚誘発反応には、蝸牛神経と脳幹部聴覚路からの早期潜時成分（0～10ミリ秒）、視床と大脳皮質からの中期潜時成分（10～80ミリ秒）、及び大脳皮質からの後期潜時成分（80～500ミリ秒以降）がある⁸⁷⁾。今回、ピッチ情報の処理は、皮質下ではなく、大脳皮質で処理されとする先行研究^{31,88)}に基づき、大脳皮質からの後期潜時成分と関連する N100m のみを解析した。

定位的脳波記録電極留置術（stereo-electroencephalographic exploration, SEEG）^{69,89)}、脳波⁹⁰⁻⁹²⁾及び脳磁図⁹³⁾で報告された P30/P30m の研究では、30ミリ秒より短い刺激音を使っている。実際に、30ミリ秒より長い刺激音、例えば50ミリ秒、を使う場合は、P30/P30m の波形があまり強く見えない⁷⁰⁾。P50/P50m についても同様である。さらに、いくつかの脳磁図の先行研究では、P50m の聴覚誘発反応は必ずしも出現するわけではないとされている⁶⁹⁻⁷¹⁾。

本研究では、500ミリ秒のトーンバストで聴覚反応を誘発したことより、P30m と P50m の反応は観察しにくくなる。しかし、Ladd らの報告にあるように、刺激音を500ミリ秒から180ミリ秒へ短くすると、被験者はピッチ判断しにくくなる⁸²⁾。従

って、ピッチの認知の実験では、比較的長い持続時間を持っている刺激音が必要であり、P30m や P50m ではなく、本研究のように潜時が長い N100m の聴覚誘発反応を観察することが妥当であると考えられる。

また、P50/P50m は、感覚ゲーティング (Sensory gating) のメカニズムにより影響されることが知られている⁶⁵⁻⁶⁸⁾。具体的には、音に対し注意をそらして (Distraction) P50 を記録した場合に比べると、注意した場合 (Target monitoring) の P50 の振幅は明らかに低減される⁹⁴⁾。すなわち、本研究のテーマであるミッシングファンダメンタルピッチを聞き分ける様な課題の場合において、P50 あるいは P50m を用いて評価を試みると、感覚ゲーティングにより P50 あるいは P50m の振幅が低下し、評価対象としてふさわしくないことが示唆される。一方、N100/N100m であるが、非周期的刺激音と比較し周期的刺激音が、より高振幅の N100m 反応を誘発することから^{58,59)}、N100/N100m はピッチのような特定の刺激音のコード化を反映すると考えられる⁹⁵⁾。加えて、ピッチ f_0 を含まないミッシングファンダメンタルの刺激音を用いた誘発反応と純音 f_0 を用いた誘発反応の N100m の信号源位置が近くに推定され、一方、ピッチ f_0 を含まないハーモニクスにより誘発された N100m の信号源位置と純音 f_0 を用いた誘発反応の N100m の信号源位置は離れて推定される^{61,96)}。即ち、N100m がミッシングファンダメンタルのエンコーディングとピッチ認知に関連する脳活動であると考えられる^{97,98)}。

以上より P50m ではなく N100m を用いた本研究の妥当性が示されたと考える。

5.4 ヘシュル回・側頭平面とピッチセンター

本研究では、N100m の信号源位置を、被検者個人別に検討した結果、ヘシュル回あるいは側頭平面に推定した。

これまで fMRI を用いた手法では、ピッチセンターがヘシュル回^{24, 30, 31, 33, 99)}あるいは側頭平面の可能性があると報告に加えて、ヘシュル回と側頭平面の両方が関与する^{6, 25, 27, 28, 32)}とする報告もある。同様に脳磁図を用いた手法においても N100m の起源がヘシュル回¹⁰⁴⁾あるいは側頭平面である³⁴⁾とする報告、ヘシュル回と側頭平面の両方^{35, 36)}とする報告がある。さらに、深部電極を用い直接聴覚皮質より記録した検討においても、刺激音のオンセットより 100 ミリ秒までの間に、ヘシュル回と側頭平面の活動しか認めないとする報告がある¹⁰⁵⁾。

本研究では、個々の被験者のデータを単独で分析し、N100m の起源は、ヘシュル回あるいは側頭平面に推定できた。聴覚皮質のネットワークでは、聴覚の機能はシリアル (Serial) とパラレル (Parallel) 処理が行われている¹⁰⁵⁾。即ち、N100m の起源にヘシュル回と側頭平面の両方が関与している可能性が強く示唆される。

本研究の結果は、ピッチ認知処理センターは右大脳半球のヘシュル回と側頭平面に存在し、左大脳半球のヘシュル回と側頭平面はハーモニクス成分の認知処理センターであることを示唆している。

最近のピッチ知覚の神経機構の知見では、Wengenroth らは MRI を用いて脳の灰

白質の体積の評価をし、絶対音感の認知能力を持っていない群より、絶対音感の認知能力を有する群は、右半球のヘシュル回の皮質体積が大きいこと、心理実験で行った絶対音感のテストの点数より、絶対音感の **performance** が熟達した場合は、右のヘシュル回の体積が更に増加することを報告した¹⁰⁶⁾。また、脳磁図では、N100m で絶対音感の認知能力を有する群の右半球のヘシュル回と側頭平面の振幅が、絶対音感の認知能力を持ってない群より大きいことを報告し、右半球の聴覚皮質のネットワークでピッチを認知すると考察した¹⁰⁶⁾。彼らの研究結果は、我々のピッチ認知処理センターは右大脳半球のヘシュル回と側頭平面に存在するとの結論に矛盾しない。しかし、絶対音感の認知能力を有する群の右半球の側頭平面の皮質体積が、絶対音感の認知能力を持ってない群より小さいことを報告した研究^{100,106-108)}もあり、絶対音感と皮質体積の関係はまだ簡単に解釈できない。

また、Patel ら⁴²⁾は脳磁図を用いて、定常的な音の刺激によって誘発される聴性定常状態誘発反応 (Auditory Steady-State Evoked Response, ASSR) の位相を評価した。聴性定常状態誘発反応は、音の刺激のキャリア周波数 (Carrier Frequency, CF) に関わらず、振幅変調 (Amplitude Modulation, AM) の頻度に対応した誘発反応が定常的であり、それを誘発させる音が持続している間は存在する。また、振幅変調音との間で位相が一致する (Phase Locked)¹⁰⁹⁾。Patel ら⁴²⁾の発見より、ミッシングファンダメンタルの振幅変調音より誘発された聴性定常状態誘発反応の脳活動については、ファンダメンタルの認知能力を有する群の場合は、左半球では、ミッシング

ファンダメンタルの振幅変調音との位相が一致であり、右半球では、ミッシングファンダメンタルの振幅変調音との位相が逆である。ハーモニクス成分の認知能力を有する群の場合は、右半球も左半球も、ミッシングファンダメンタルの振幅変調音との位相が一致であることを報告した⁴²⁾。さらに、純音及びピッチを含んでいる複合音の振幅変調音より誘発された聴性定常状態誘発反応の脳活動については、右半球も左半球も群間の差が見えないと報告した⁴²⁾。位相の変化が時間情報を示している知見及び Patel らの発見より、ピッチ認知に関して、大脳右半球のヘシュル回と側頭平面に、音の中の周波数成分を分析し、存在していないピッチの周波数を計算する機能があり、左半球には、音の中の周波数成分をそのまま認識する機能があることが示唆され、本研究の実験結果を支持する。

さらに、先天失音楽症 (congenital amusia) より生じたピッチ認知障害 (Tone deafness) の患者さんは、音楽能力障害があり、特にピッチ認知、復唱 (reproduction) の能力がないことが知られている¹¹⁰⁾。最近の MRI を用いて脳の灰白質の体積の評価した報告より、ピッチ認知障害を持っている患者さんは、右半球の下前頭回 (inferior frontal gyrus, IFG) と右半球の聴覚皮質が大きく¹¹¹⁾、拡散テンソル画像法 (Diffusion Tensor Imaging, DTI) で、右半球の前頭葉と側頭葉を結んでいる神経経路 (fronto-temporal pathway) という上弓状束 (superior arcuate fasciculus, SAF) が奇形 (structural abnormalities) であり^{112,113)}、右半球の異常な神経発達がピッチ認知障害の成因である¹¹⁴⁾と考えられている。ピッチ認知障害の研究結果からの知見

は、我々の右半球はピッチ認知処理の役割であるとの結論に矛盾しない。

本研究および先行研究の結果より、音の複雑な変化を分析する、音色、ハーモニクスなどの高調波の処理に関しては、左半球のヘシュル回と側頭平面が関することが分かった。この結果は、第二言語の習得に関する先行研究では、MRI では、音調言語（tonal language）の習得能力が高い被験者の場合は、左半球のヘシュル回皮質体積が大きく、左のヘシュル回が言語の習得と関連すること¹¹⁵⁾と一致している。ハーモニクス成分の認知能力が高い者は、音の中のハーモニクス成分で音の高さを判断し、音を認知する脳活動は左半球優位であることより、中国語などの音調言語や、言語のプロソディ・イントネーションが豊富である外国語の習得能力が上手になることが期待できる。

本研究の将来への応用としては、音楽治療（music therapy）への応用が考えられる。音楽療法は、先天の神経発達異常及び後天の事故より生じた認知障害のリハビリテーションに効果があるが、同じ障害を持っている全ての患者さんに効果があるわけではない¹¹⁶⁻¹¹⁸⁾。本研究の知見より、人間の音の認知の脳内情報処理メカニズムは、ピッチ認知とハーモニクス認知メカニズムの二つがあり、患者さんの音を認知する特徴より、最適な音調或は音色が豊富の音楽刺激訓練法の開発などへの貢献が期待される。

6. 結論

本研究では、ファンダメンタルの認知能力が強い被験者群とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者群のピッチ認知神経基盤を明らかにした。

ファンダメンタルの認知能力が強い被験者群は、左半球より、右半球の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が大きいこと、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者群は、右半球より、左半球の N100m の聴覚誘発反応の活動強度が大きいことが示された。さらに、ピッチ認知処理センターが右大脳半球のヘシュル回と側頭平面に存在すること、ハーモニクス認知処理センターが左大脳半球のヘシュル回と側頭平面であることが示唆された。これらの結果より、ピッチ処理は音の認知パターンによって異なること、また大脳左右半球の機能差が存在すると考察した。また、二つの群の N100m において、左右大脳半球の側性化程度と楽器演奏に関する音楽経験年数の間の統計的な相関性がなかったことより、音の認知メカニズムの種類は音楽的要素と関係がないことも示唆された。

7. 謝辞

本研究を行うにあたり、東北大学加齢医学研究所脳機能開発研究分野・川島隆太教授、横山悟先生、杉浦先生、瀧先生、菅野彰剛先生、荒木剛先生、野内類先生、池田純起先生、鄭嬌婷（ジョンヒョンジョン（韓））先生、博士大学院生宮崎敦子さん、横山諒一さん、河田サントスケルシ人美さん、石鍋浩さん、佐藤千穂さん、学部生千葉直貴さん、技術補佐員山田有希さん、東北大学電気通信研究所先端音情報システム研究室・教授鈴木陽一先生、技官齋藤文孝さん、横河電機株式会社・山本育典氏、久保田寛氏、木村友哉氏、に研究指導を賜りましたことを深く感謝致します。また、東北大学加齢医学研究所脳機能開発研究分野・鈴木聖子さん、鄭嬌婷先生のサポートに深く感謝致します。

本研究に対する JSPS 特別研究員奨励費（課題番号 26・7619）東北大学大学院医学系研究科ルネサンス計画事業リトリートの助成、JT アジア奨学金（JT1209）、菅原医学振興基金奨学助成、東北大学外国人留学生総長特別奨学生（030004）に深く感謝致します。

8. 参考文献

1. Ohm GS: Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen. Ann Phys Chem 1843;59:513-565
2. Schouten JF, Ritsma RJ, Cardozo BL: Pitch of the residue. J Acoust Soc Am 1962;34:1418-1424
3. Plomp R: The ear as a frequency analyzer. J Acoust Soc Am 1964;36:1628-1636
4. Sauveur J: Système général des intervalles des sons, & son application à tous les systèmes & à tous les instruments de musique. Mém Acad Sci Paris 1704;1701:297-364
5. Bendor D: Does a pitch center exist in auditory cortex? J Neurophysiol 2012;107:743-746
6. Plack CJ, Barker D, Hall DA: Pitch coding and pitch processing in the human brain. Hear Res 2014;307:53-64
7. Plomp R: Pitch of complex tones. J Acoust Soc Am 1967;41:1526-1533
8. Smoorenburg GF: Pitch perception of two-frequency stimuli. J Acoust Soc Am 1970;48:924-942
9. von Helmholtz HLF: Die Lehre von den Tonempfindungen als

- physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. 1st ed, F Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1863;Chap 4
10. von Helmholtz HLF: On the sensations of tone as a Physiological Basis for the Theory of Music, 4th ed. Trans. A.J. Ellis, New York: Dover. 1954.
 11. González DL, Morettini L, Sportolari F, et al: Pitch Perception of Complex Sounds: Nonlinearity Revisited. Proceedings of 2nd International Conference on Acoustic and Musical Research (CIARM) Ferrara Italy 1995;19-21
 12. Charles LB: Lessons in Elementary Practical Physics, Vol. III, Part 1, Practical Acoustics Co. Ltd, London Macmillan, 1897
 13. Dayton CM: The Science of Musical Sounds. The Macmillan Company. 1916
 14. Ohm GS: Noch ein Paar Worte über die Definition des Tones. Ann Phys Chem 1844;62:1-18
 15. David MH, Jamie ASA: Acoustics and psychoacoustics. Focal Press 2006;p123
 16. Truesdell C: The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies. Leonhardi Euleri Opera Omnia Ser. II, 11, Pt. 2, 32. 1960;1638-1788
 17. Seebeck A: Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung

- von Tönen. Ann Phys Chem 1841;53:417-436
18. Schouten JF: The perception of subjective tones. Koninklijke
Nederlandse Akademie van Wetenschappen Proc 1938;41:1086-1093
19. Schouten JF: The Residue, a New Component in Subjective Sound
Analysis. Proc Koninkl Ned Akad Wetenschap 1940;43:356-365
20. Licklider, JCR: A duplex theory of pitch perception. Experientia
1951;7:128-134
21. Green DM: An Introduction to Hearing. Erlbaum, Hillsdale, NJ. 1976
22. Zatorre RJ: Pitch perception of complex tones and human temporal-lobe
function. J Acoust Soc Am 1988;84:566-572
23. Warren JD, Uppenkamp S, Patterson RD, et al: Separating pitch
chroma and pitch height in the human brain. Proc Natl Acad Sci USA.
2003;100:10038-10042.
24. Hall DA, Edmondson-Jones AM, Fridriksson J: Periodicity and
frequency coding in human auditory cortex. Eur J Neurosci
2006;24:3601-3610
25. Hall DA, Plack CJ: The human 'pitch center' responds differently to
iterated noise and Huggins pitch. Neuroreport 2007;18:323-327
26. Hall DA, Plack CJ: Pitch processing sites in the human auditory brain.

Cereb Cortex 2009;19:576-585

27. Garcia D, Hall DA, Plack CJ: The effect of stimulus context on pitch representations in the human auditory cortex. *Neuroimage* 2010;51:808-816
28. Barker D, Plack CJ, Hall DA: Human auditory cortical responses to pitch and to pitch strength. *Neuroreport* 2011;22:111-115
29. Griffiths TD, Rees G, Rees A, et al: Right parietal cortex is involved in the perception of sound movement in humans. *Nat Neurosci* 1998;1:74-79
30. Patterson RD, Uppenkamp S, Johnsrude IS, et al: The processing of temporal pitch and melody information in auditory cortex. *Neuron* 2002;36:767-776
31. Penagos H, Melcher JR, Oxenham AJ: A neural representation of pitch salience in nonprimary human auditory cortex revealed with functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci* 2004;24:6810-6815
32. Barker D, Plack CJ, Hall DA: Reexamining the evidence for a pitch-sensitive region: a human fMRI study using iterated ripple noise. *Cereb Cortex* 2012;22:745-753
33. Puschmann S, Uppenkamp S, Kollmeier B, et al: Dichotic pitch

- activates pitch processing centre in Heschl's gyrus. *Neuroimage* 2010;49:1641-1649
34. Lütkenhöner B, Steinsträter O: High-precision neuromagnetic study of the functional organization of the human auditory cortex. *Audiol Neurotol* 1998;3:191--213
35. Godey B, Schwartz D, de Graaf JB, et al: Neuromagnetic source localization of auditory evoked fields and intracerebral evoked potentials: a comparison of data in the same patients. *Clin Neurophysiol* 2001;112:1850-1859
36. Andermann M, van Dinther R, Patterson RD, et al: Neuromagnetic representation of musical register information in human auditory cortex. *Neuroimage* 2011;57:1499-1506
37. Hertrich I, Mathiak K, Lutzenberger W, et al: Time course and hemispheric lateralization effects of complex pitch processing: evoked magnetic fields in response to rippled noise stimuli. *Neuropsychologia* 2004;42:1814-1826
38. Chait M, Poeppel D, Simon JZ: Neural response correlates of detection of monaurally and binaurally created pitches in humans. *Cereb Cortex* 2006;16:835-848

39. Krumbholz K, Patterson RD, Seither-Preisler A, et al: Neuromagnetic evidence for a pitch processing center in Heschl's gyrus. *Cereb Cortex* 2003;13:765-772
40. Seither-Preisler A, Patterson R, Krumbholz K, et al: Evidence of pitch processing in the N100m component of the auditory evoked field. *Hear Res* 2006;213:88-98
41. Fujioka T, Ross B, Okamoto H, Takeshima Y, Kakigi R, Pantev C (2003) Tonotopic representation of missing fundamental complex sounds in the human auditory cortex. *Eur J Neurosci*. 18:432-440
42. Patel AD, Balaban E: Human pitch perception is reflected in the timing of stimulus-related cortical activity. *Nat Neurosci* 2001;4:839-44
43. Maess B, Koelsch S, Gunter TC, et al: Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nat Neurosci* 2001;4:540-545
44. Devlin JT, Raley J, Tunbridge E, et al: Functional asymmetry for auditory processing in human primary auditory cortex. *J Neurosci*. 2003 Dec 17;23(37):11516-22.
45. Schneider P, Sluming V, Roberts N, et al: Structural and functional asymmetry of lateral Heschl's gyrus reflects pitch perception preference. *Nat Neurosci* 2005;8:1241-1247

46. Tillmann B, Koelsch S, Escoffier N, et al: Cognitive priming in sung and instrumental music: activation of inferior frontal cortex *NeuroImage* 2006;31:1771-1782
47. van Dijk H, Nieuwenhuis IL, Jensen O: Left temporal alpha band activity increases during working memory retention of pitches. *Eur J Neurosci* 2010;31:1701-1707
48. Behroozmand R, Ibrahim N, Korzyukov O, et al: Left-hemisphere activation is associated with enhanced vocal pitch error detection in musicians with absolute pitch. *Brain Cogn* 2014;84:97-108
49. Gu F, Zhang C, Hu A, et al: Left hemisphere lateralization for lexical and acoustic pitch processing in Cantonese speakers as revealed by mismatch negativity. *Neuroimage* 2013;83:637-645
50. Rosenthal MA: Hemispheric asymmetry in the formation of musical pitch expectations: a monaural listening and probe tone study. *Neuropsychologia* 2014;65:37-40
51. Houtsma AJM, Fleuren JFM: Analytic and synthetic pitch of two-tone complexes. *J Acoust Soc Am* 1991;90:1674-1676.
52. Singh PG, Hirsh IJ: Influence of spectral locus and F0 changes on the pitch and timbre of complex tones. *J Acoust Soc Am* 1992;92:2650-2661

53. Renken R, Wiersinga-Post JEC, Tomaskovic S, et al: Dominance of missing fundamental versus spectrally cued pitch: Individual differences for complex tones with unresolved harmonics. *J Acoust Soc Am* 2004;115:2257-2263
54. Goldstein JL: An optimum processor theory for the central formation of the pitch of complex tones. *J Acoust Soc Am* 1973;54:1496-1516
55. Risma RJ: Frequencies dominant in the perception of the pitch of complex sounds. *J Acoust Soc Am* 1967;42:191-198
56. Terhardt E: Pitch, consonance and harmony. *J Acoust Soc Am* 1974;55:1061-1069
57. Wightman FL: The pattern-transformation model of pitch. *J Acoust Soc Am* 1973;54:407-16
58. Gutschalk A, Patterson RD, Rupp A, et al: Sustained magnetic fields reveal separate sites for sound level and temporal regularity in human auditory cortex. *NeuroImage* 2002;15:207-216
59. Hertrich I, Mathiak K, Lutzenberger W, et al: Differential impact of periodic and aperiodic speech-like acoustic signals on magnetic M50/M100 fields. *NeuroReport* 2000;11:4017-4020
60. Pantev C, Elbert T, Ross B, et al: Binaural fusion and the representation

- of virtual pitch in the human auditory cortex. *Hear Res* 1996;100:164-70
61. Pantev C, Hoke M, Lütkenhöner B, et al: Tonotopic organization of the auditory cortex: pitch versus frequency representation. *Science* 1989;246:486-488
 62. Schneider P, Scherg M, Dosch HG, et al: Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nat Neurosci* 2002;5:688-694
 63. Zatorre RJ, Belin P: Spectral and temporal processing in human auditory cortex. *Cereb Cortex* 2001;11:946-953
 64. Susann D, Birgit G-M, André B, et al: Auditory stream segregation relying on timbre involves left auditory cortex. *Neuroreport* 2004;15:1511-1514
 65. Boutros NN, Belger, A: Midlatency evoked potentials attenuation and augmentation reflect different aspects of sensory gating. *Biological Psychiatry* 1999;45:917-922
 66. Miyazato H, Skinner RD, Garcia-Rill E: Sensory gating of the P13 midlatency auditory evoked potential and the startle response in the rat. *Brain Research* 1999;822:60-71
 67. Ninomiya H, Sato E, Onitsuka T, et al: Auditory P50 obtained with a

repetitive stimulus paradigm shows suppression to high-intensity tones.

Psychiatry and Clinical Neurosciences 2000;54:493-497

68. Starr A, Aguinaldo T, Roe M, et al: Sequential changes of auditory processing during target detection: Motor responding versus mental counting. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* 1997;105:201-212
69. Liégeois-Chauvel C, Musolino A, Badier JM, et al: Evoked potentials recorded from the auditory cortex in man: evaluation and topography of the middle latency components. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1994;92:204-214
70. Pantev C, Bertrand O, Eulitz C, et al: Specific tonotopic organizations of different areas of the human auditory cortex revealed by simultaneous magnetic and electric recordings. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;94:26-40.
71. Mäkelä JP, Hämäläinen M, Hari R, et al: Whole-head mapping of middle-latency auditory evoked magnetic fields. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1994;92:414-421
72. Johnsrude IS, Penhune VB, Zatorre RJ: Functional specificity in the right human auditory cortex for perceiving pitch direction. *Brain*

2000;123:155-163

73. Oldfield RC: The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971;9:97-113
74. 菅野彰剛, 川島隆太: 「医療における診断技術の研究開発」 一脳磁図の臨床応用. *Science Portal China* 2010
75. Naka D, Kakigi R, Hoshiyama M, et al: Structure of the auditory evoked magnetic fields during sleep. *Neuroscience* 1999;93:573-583
76. Nielsen-Bohlman L, Knight RT, Woods DL, et al: Differential auditory processing continues during sleep. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1991;79:281-290
77. Nakasato N, Fujita S, Seki K, et al: Functional localization of bilateral auditory cortices using an MRI-linked whole head magnetoencephalography (MEG) system. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;94:183-190
78. Nakasato N, Kumabe T, Kanno A, et al: Neuromagnetic evaluation of cortical auditory function in patients with temporal lobe tumors. *J Neurosurg.* 1997;86:610-618
79. Sarvas J: Basic mathematical and electromagnetic concepts of the biomagnetic inverse problem. *Phys Med Biol* 1987;32:11-22

80. Charlton BD, Taylor AM, Reby D. Are men better than women at acoustic size judgements? *Biol Lett*. 2013;9:20130270
81. Cohen H, Levy JJ, McShane D. Hemispheric specialization for speech and non-verbal stimuli in Chinese and French Canadian subjects. *Neuropsychologia*. 1989;27:241-245
82. Ladd DR, Turnbull R, Browne C, et al: Patterns of individual differences in the perception of missing-fundamental tones. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2013;39:1386-1397.
83. Seither-Preisler A, Johnson L, Krumbholz K, et al: Tone Sequences With Conflicting Fundamental Pitch and Timbre Changes Are Heard Differently by Musicians and Nonmusicians. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*. 2007;33:743-751
84. Warrier C, Wong P, Penhune V, et al: Relating structure to function: Heschl's gyrus and acoustic processing. *J Neurosci* 2009;29:61-69
85. Zatorre, RJ: How does the brain process complex sound? Current controversies. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry* 2002;72:825-825
86. Robin DA, Tranel D, Damasio, H: Auditory perception of temporal and spectral events in patients with focal left and right cerebral lesions.

Brain and Language 1990;39:539-555

87. Kraus N, McGee T: Electrophysiology of the human auditory system. ed, Popper AN, Fay RR, The mammalian auditory pathway: neurophysiology. Springer, New York, 1992;335-403
88. Steinmann I, Gutschalk A: Sustained BOLD and theta activity in auditory cortex are related to slow stimulus fluctuations rather than to pitch. J Neurophysiol 2012;107:3458-3467
89. Liegeois-Chauvel C, Musolino A, Chauvel P: Localization of the primary auditory area in man. Brain 1991;114:139-151
90. Streletz LJ, Katz L, Hohenberger M, et al: Scalp recorded auditory evoked potentials and sonomotor responses: an evaluation of components and recording techniques. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1977;43:192-206
91. Ozdamar O, Kraus N: Auditory middle-latency responses in humans. Audiology. 1983;22:34-49
92. Cacace AT, Satya-Murti S, Wolpaw JR: Human middle-latency auditory evoked potentials: vertex and temporal components. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 1990;77:6-18
93. Rupp A, Hack S, Gutschalk A, et al: Fast temporal interactions in

- human auditory cortex. *Neuroreport* 2000;11:3731-3736
94. Guterman Y, Josiassen RC, Bashore TR. Attentional influence on the P50 component of the auditory event-related brain potential. *International Journal of Psychophysiology* 1992;12:197-209
 95. Näätänen R, Winkler I: The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin*, 1999;125:826-859
 96. Pantev C, Elbert T, Ross B, et al: Binaural fusion and the representation of virtual pitch in the human auditory cortex. *Hear Res* 1996;100:164-70
 97. Ragot R, Lepaul-Ercole R: Brain potentials as objective indexes of auditory pitch extraction from harmonics. *Neuroreport* 1996;7:905-909
 98. Crottaz-Herbette S, Ragot R: Perception of complex sounds: N1 latency codes pitch and topography codes spectra. *Clin Neurophysiol* 2000;111:1759-1766
 99. Ritter S, Günter Dosch H, Specht HJ, Rupp A. Neuromagnetic responses reflect the temporal pitch change of regular interval sounds. *Neuroimage* 27: 533-543, 2005
 100. Keenan JP, Thangaraj V, Halpern AR, et al: Absolute pitch and planum temporale. *Neuroimage* 2001;14:1402-1408
 101. Ohnishi T, Matsuda H, Asada T, et al: Functional anatomy of

- musical perception in musicians. *Cereb Cortex* 2001;11:754-760
102. Deouell LY, Heller AS, Malach R, et al: Cerebral responses to change in spatial location of unattended sounds. *Neuron* 2007;55:985-996
 103. Ellis RJ, Norton AC, Overy K, et al: Differentiating maturational and training influences on fMRI activation during music processing. *Neuroimage* 2012;60:1902-1912
 104. Pantev C, Hoke M, Lehnertz K, et al: Identification of sources of brain neuronal activity with high spatiotemporal resolution through combination of neuromagnetic source localization (NMSL) and magnetic resonance imaging (MRI). *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1990;75:173-184
 105. Guéguin M, Le Bouquin-Jeannès R, Faucon G, et al: Evidence of functional connectivity between auditory cortical areas revealed by amplitude modulation sound processing. *Cereb Cortex* 2007;17:304-313
 106. Wengenroth M, Blatow M, Heinecke A, et al: Increased volume and function of right auditory cortex as a marker for absolute pitch. *Cereb Cortex* 2014;24:1127-1137
 107. Wilson SJ, Lusher D, Wan CY, et al: The neurocognitive

- components of pitch processing: insights from absolute pitch. *Cereb Cortex*. 2009;19:724-32.
108. Schlaug G, Jäncke L, Huang Y, et al: In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. *Science*. 1995;267:699-701
 109. Galambos R, Makeig S, Talmachoff PJ. A 40-Hz auditory potential recorded from the human scalp. *Proc Natl Acad Sci USA*. 1981;78:2643-2647
 110. Cuddy LL, Balkwill LL, Peretz I, et al: Musical difficulties are rare: a study of “tone deafness” among university students. *Ann N Y Acad Sci*. 2005;1060:311–324
 111. Hyde KL, Lerch JP, Zatorre RJ, et al: Cortical thickness in congenital amusia: when less is better than more. *J Neurosci*. 2007;27:13028–13032
 112. Loui P, Alsop D, Schlaug G. Tone deafness: a new disconnection syndrome? *J Neurosci*. 2009;29:10215-10220
 113. Loui P, Schlaug G. Investigating musical disorders with diffusion tensor imaging: a comparison of imaging parameters. *Ann N Y Acad Sci*. 2009;1169:121–125
 114. Williamson VJ, Stewart L. Congenital amusia. *Handb Clin Neurol*.

2013;111:237–239

115. Wong PC, Warrier CM, Penhune VB, et al: Volume of left Heschl's Gyrus and linguistic pitch learning. *Cereb Cortex* 2008;18:828-836
116. Coppola G, Toro A, Operto FF, et al: Mozart's music in children with drug-refractory epileptic encephalopathies. *Epilepsy Behav.* 2015;50:18-22
117. Merakou K, Varouxu G, Barbouni A, et al: Blood Pressure and Heart Rate Alterations through Music in Patients Undergoing Cataract Surgery in Greece. *Ophthalmol Eye Dis.* 2015;7:7-12
118. Doering B, Exner C. Combining neuropsychological and cognitive-behavioral approaches for treating psychological sequelae of acquired brain injury. *Curr Opin Psychiatry.* 2011;24:156-161

9. 図

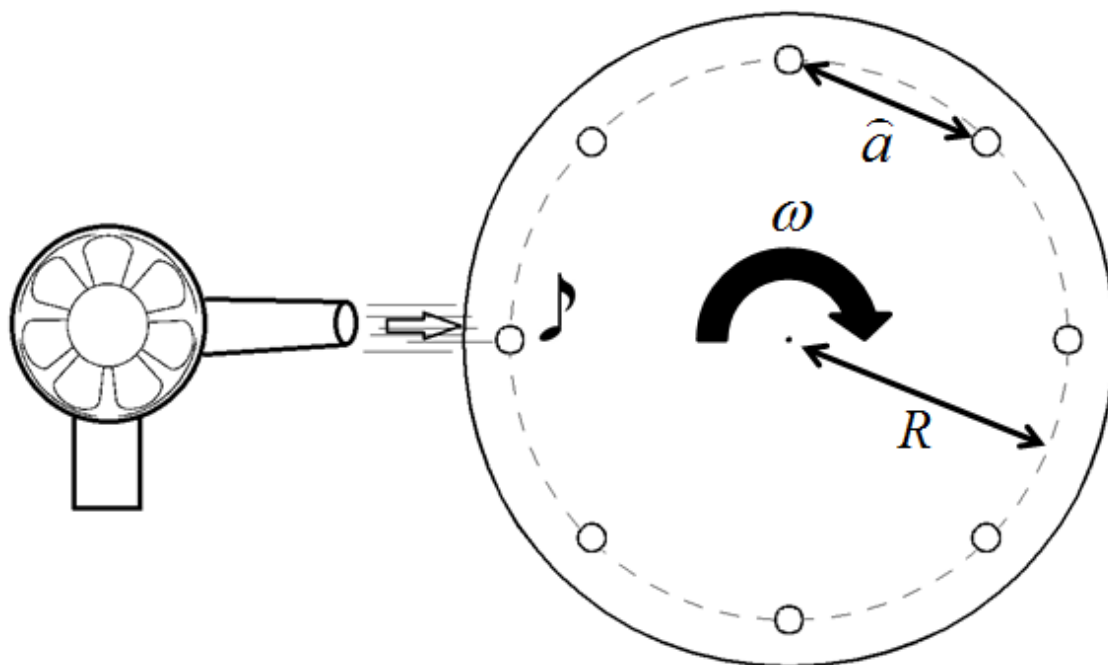


図1 Seebeck が作った Siren disk

ディスクにある半径が R の同心円のトラックに、一定な距離(例えば、弧の長さ \hat{a})で直径が \hat{a} より短いホールを複数作成する。このディスクが一定な角速度 ω で回っている時に、気流を垂直に同心円のトラックの上から吹かせて音が生じる。

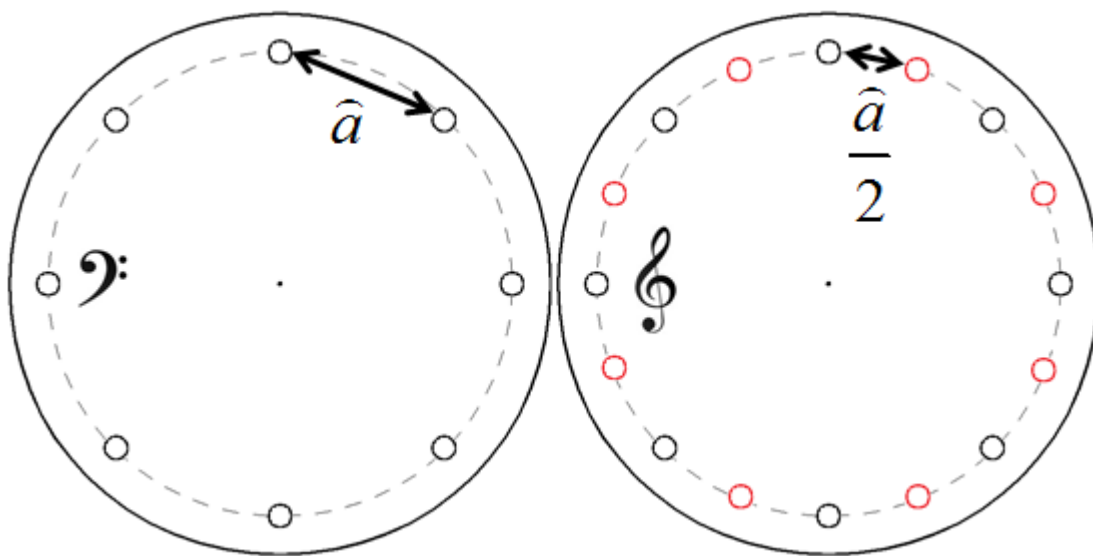


図2 ホールの数量とピッチの高さの関係

音の中のピッチは、一秒につき気流が通過したホールの数量より作られたものであ

り、単位時間内に通過するホールの数量とピッチの高さは正相関する

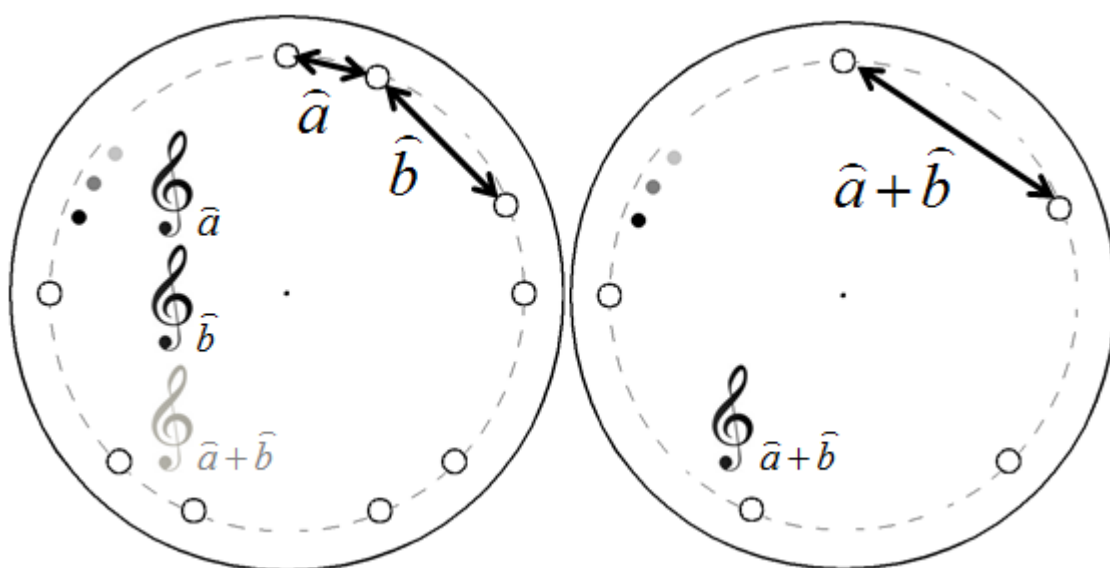


図3 ミッシングファンダメンタルピッチの発見

左図の弧の長さは \hat{a} と \hat{b} で生じた二つの音より、もう一つの存在していない音が聞こえる。その音は、右図の弧の長さ $\hat{a}+\hat{b}$ で生じた音と同じである。

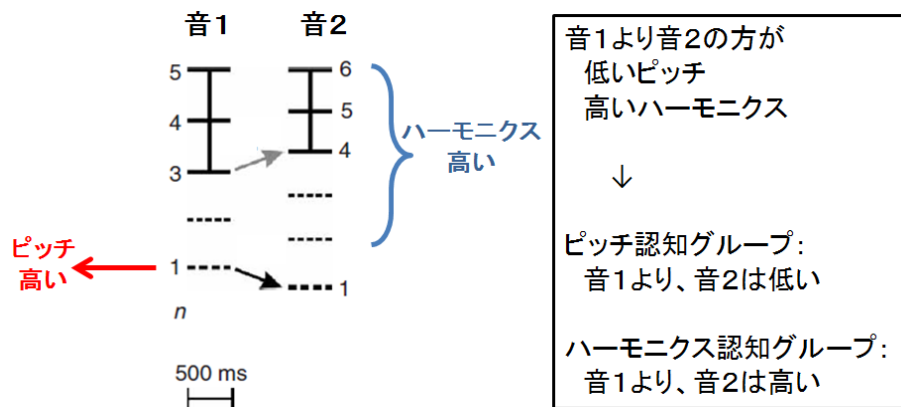
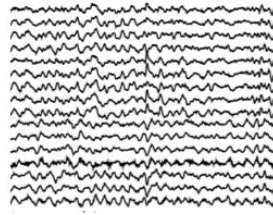
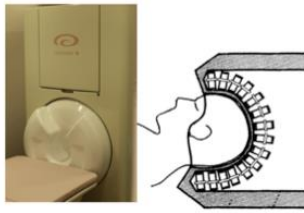


図4 ピッチ判断タスク

音1のピッチは音2のピッチよりも高いが、ハーモニクスは逆になる。よって、音1と音2を聞いて、音1が高いと答えた被験者はピッチの認識ができたことになり、逆に音2が高いと答えた被験者は、ピッチ認識ができなく、ハーモニクスを認知できたことになる。

脳磁図



+

MRI

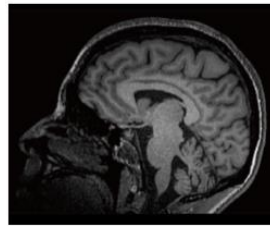


図5 脳磁図とMR画像の統合⁷⁴⁾

脳磁図（図上段）は脳神経の働きを波（図上段・中）として表示する計測機器であり、脳磁図計測時に前額部にマーカーコイルを装着し（上段・右）、計測時にコイルに通電することで頭部位置とセンサーの位置関係を計測する。また、被験者は光学的なスキャナを用いてコイルと頭部位置を計測する。さらに T1 強調画像の MR 画像を撮像し、立体再構成により 3D-MR 画像を作成する。最終的に脳磁図と MR 画像の位置を合わせそれぞれの情報を統合し解剖と機能を評価する。

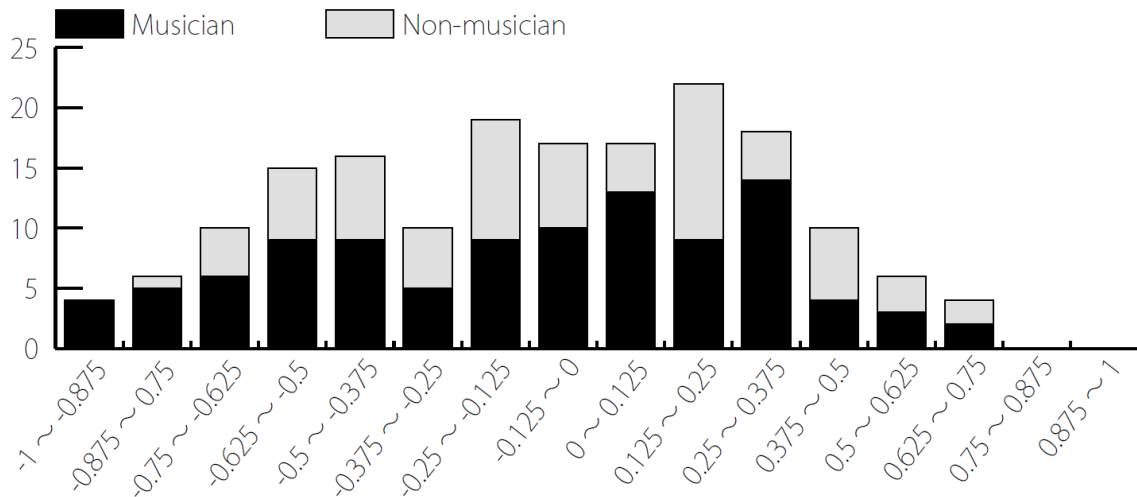


図 6 被験者のピッチ認知能力のインデックスの分布結果 (144 個トーンペア)

横軸は、インデックスである。縦軸は、人数である。

黒色柱は音楽経験者 (Musician) を表す。灰色柱は非音楽者 (Non-musician) を表す。

インデックスの分布は、Kolmogorov-Smirnov の正規性の検定で正規分布 ($p < 0.05$) を示すと判断された。

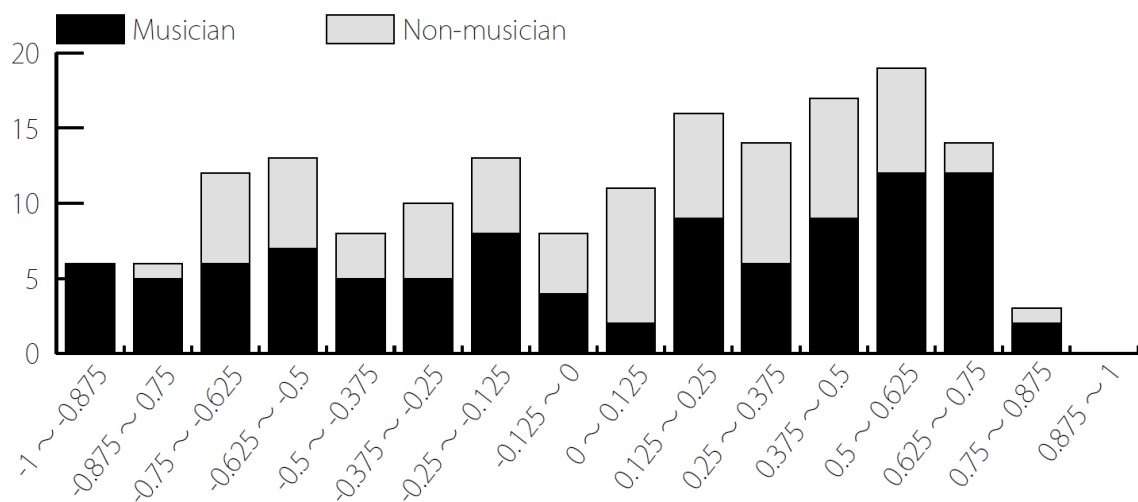


図7 被験者のピッチ認知能力のインデックスの分布結果（96 個トーンペア）

横軸は、インデックスである。縦軸は、人数である。

黒色柱は音楽経験者（Musician）を表す。灰色柱は非音楽者（Non-musician）を表す。

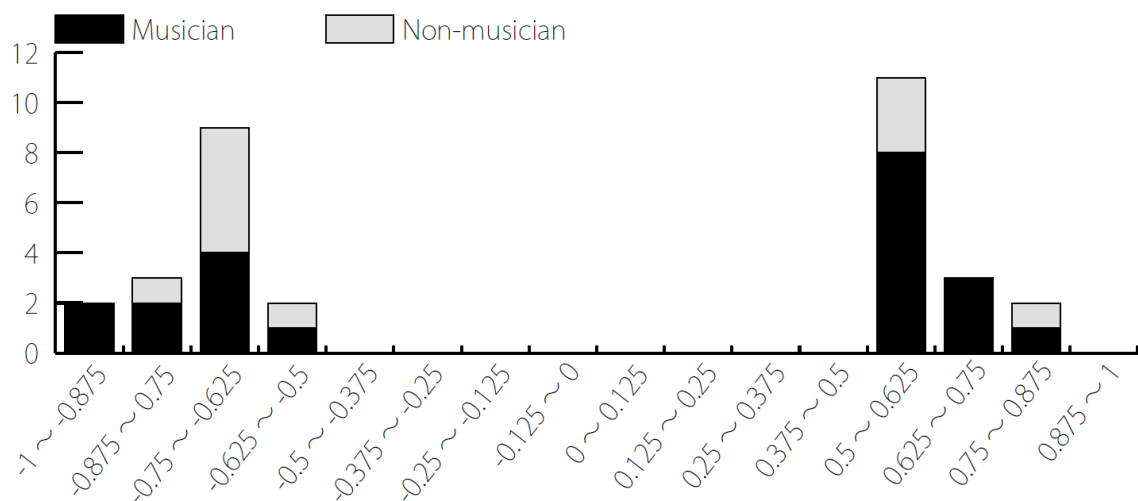


図8 MRI 撮影と脳磁図実験に参加できた被験者のインデックスの分布結果（96
個トーンペア）

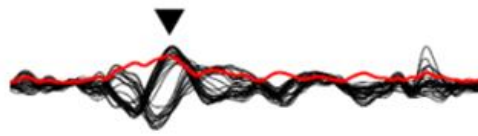
横軸は、インデックスである。縦軸は、人数である。

黒色柱は音楽経験者（Musician）を表す。灰色柱は非音楽者（Non-musician）を表す。

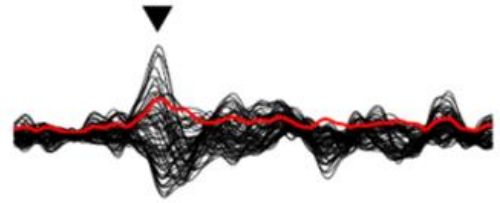
f_0 listeners

波形

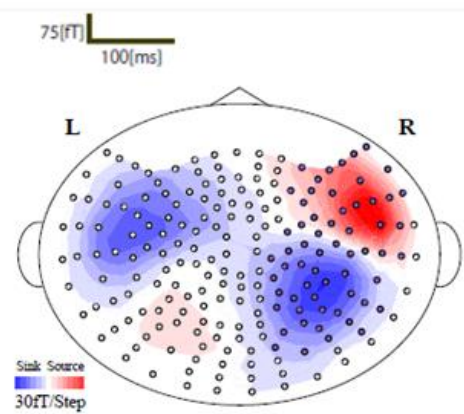
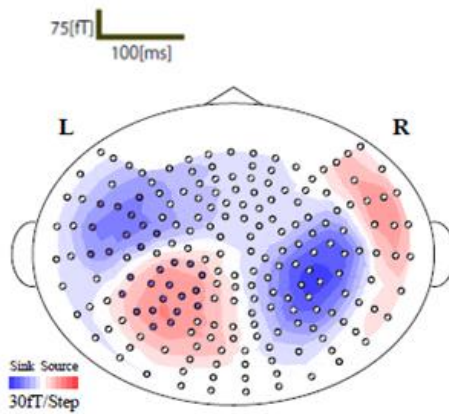
LH



RH



磁場分布



起源

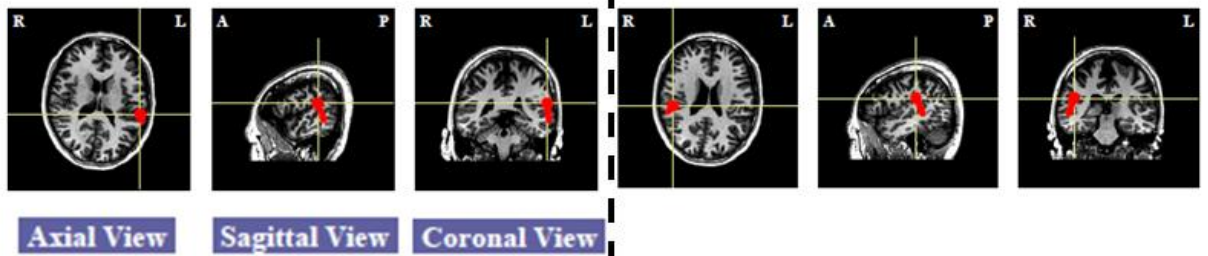


図 9 典型的な反応を示した 1 名の被験者の N100m の波形、磁場分布、起源

図上は、ファンダメンタルの認知能力が強い 1 名の被験者 (f0 listeners) の左半球 (LH) と右半球 (RH) の N100m の波形を示す。

左半球より、右半球の振幅が大きい。

赤い波形は、二乗平均平方根 (root mean square, RMS) で計算された脳磁図各センサーからの磁場強度の平均値である。

三角形は、N100m のピークである。

青色は、磁場の沈み込みを表し、赤色は、磁場の湧き出しを表している。

黒い点は、磁場をカバーする為、選んだ脳磁図の磁場センサー。

白い点は、選んでない脳磁図の磁場センサー。

図下は、同じ被験者の左半球と右半球の N100m の起源を示す。

この被験者の N100m 信号源位置は、ヘシュル回に推定された。

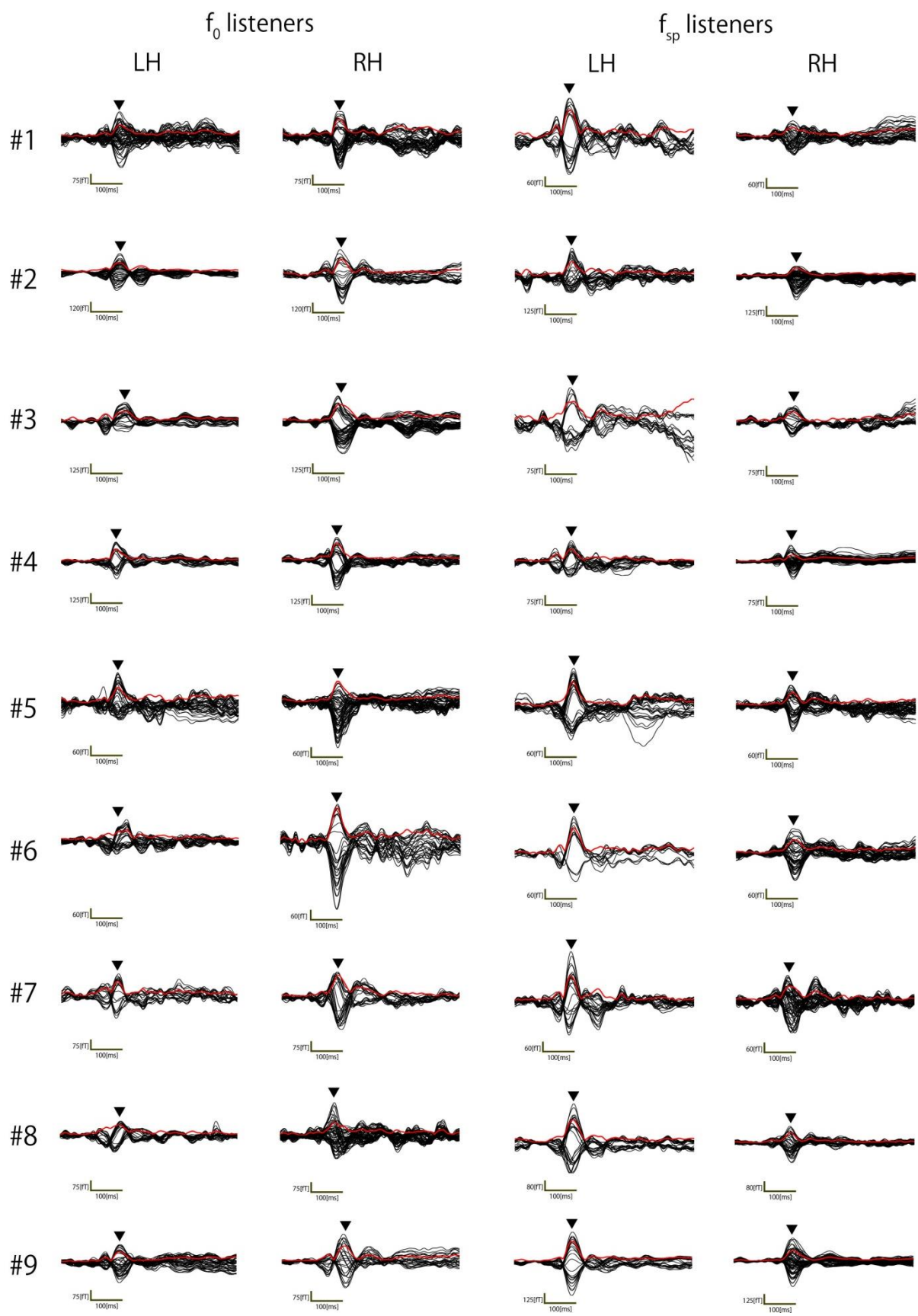


図 10 N100m の波形

図左は、9 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者 (f_0 listeners) の左半球 (LH) と右半球 (RH) の N100m の波形を示す。

図右は、9 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者 (f_{sp} listeners) の左右半球の N100m の波形を示す。

ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の場合は、左半球より、右半球の振幅が大きく、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は逆に、右半球より、左半球の振幅が大きい。

赤い波形は、二乗平均平方根 (root mean square, RMS) で計算された脳磁図各センサーからの磁場強度の平均値である。

三角形は、N100m のピークである。

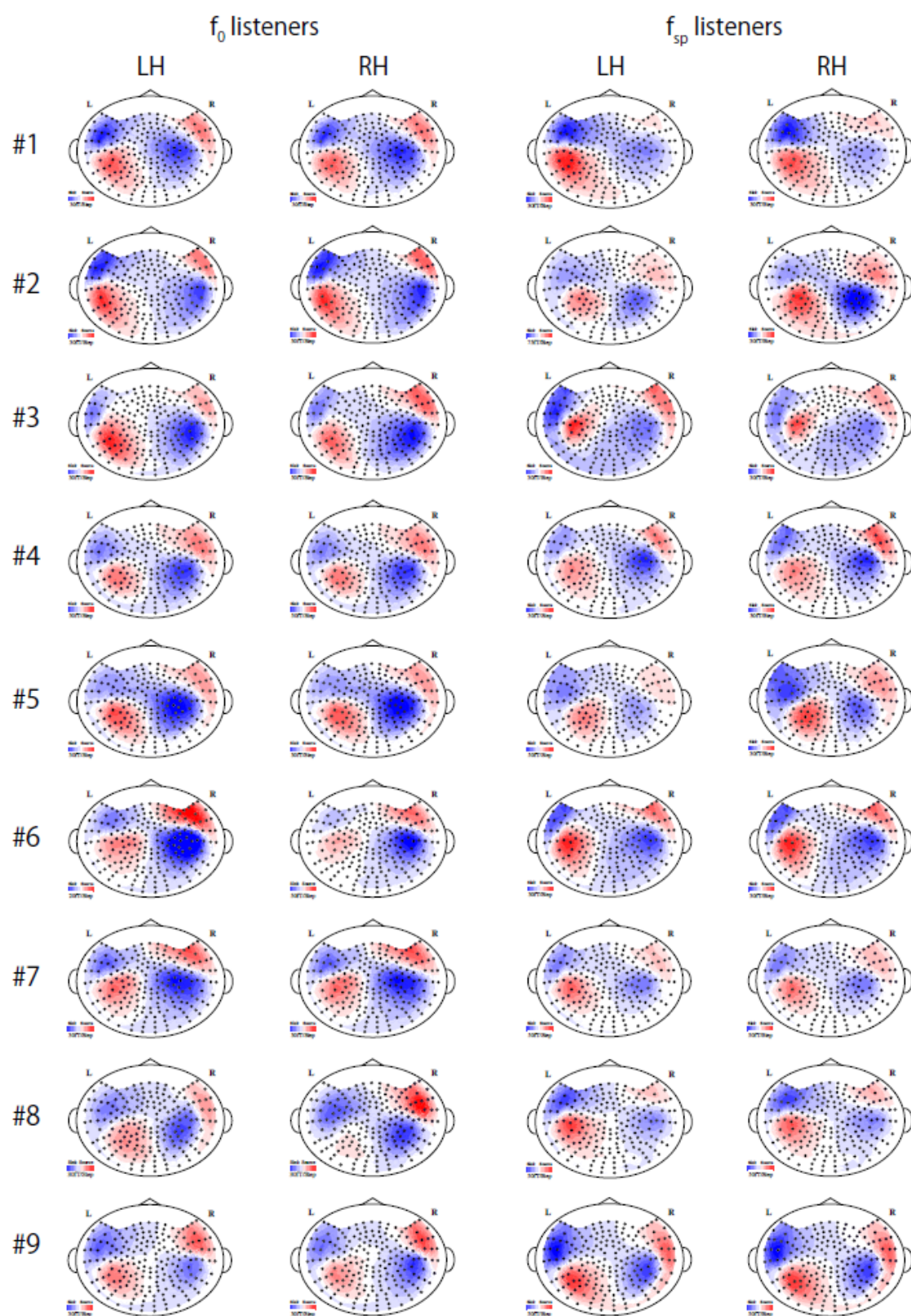


図 11 N100m の磁場分布

図左は、9 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者 (f_0 listeners) の左半球 (LH) と右半球 (RH) の N100m の磁場分布を示す。

図右は、9 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者 (f_{sp} listeners) の左右半球の N100m の磁場分布を示す。

ファンダメンタルの認知能力が強い被験者の場合は、左半球より、右半球の磁場強度が強く、ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者は逆に、右半球より、左半球の磁場強度が強い。

青色は、磁場の沈み込みを表し、赤色は、磁場の湧き出しを表している。



図 12 N100m の起源

図左は、9 名のファンダメンタルの認知能力が強い被験者 (f_0 listeners) の左半球 (LH) と右半球 (RH) の N100m の起源を示す。

図右は、9 名のハーモニクス成分の認知能力が強い被験者 (f_{sp} listeners) の左右半球の N100m の起源を示す。

全ての被験者の N100m 信号源位置は、ヘシュル回あるいは側頭平面に推定された。

10. 表

表1 心理実験で用いた 144 個のトーンペアの音の周波数情報

番号	音1の周波数成分 (Hz)					音2の周波数成分 (Hz)					
1					147	294				196	294
2					196	294				220	294
3					147	294				220	294
4					220	294				235.2	294
5				98	196	294				235.2	294
6					235.2	294				252	294
7			73.5	147	220.5	294				245	294
8					257.3	294				264.6	294
9				98	196	294			147	220.5	294
10				147	220.5	294			176.4	235.2	294
11				98	196	294			176.4	235.2	294
12				176.4	235.2	294			196	245	294
13			73.5	147	220.5	294			196	245	294
14				196	245	294			220.5	257.3	294
15		58.8	117.6	176.4	235.2	294			210	252	294
16				228.7	261.3	294			240.5	267.3	294
17			73.5	147	220.5	294		117.6	176.4	235.2	294
18			117.6	176.4	235.2	294		147	196	245	294
19			73.5	147	220.5	294		147	196	245	294
20			147	196	245	294		168	210	252	294
21		58.8	117.6	176.4	235.2	294		168	210	252	294
22			168	210	252	294		196	228.7	261.3	294
23	49	98	147	196	245	294		183.8	220.5	257.3	294
24			205.8	235.2	264.6	294		220.5	245	269.5	294
25					261.5	523				348.7	523
26					348.7	523				392.3	523
27					261.5	523				392.3	523
28					392.3	523				418.4	523
29				174.3	348.7	523				418.4	523
30					418.4	523				448.3	523
31			130.8	261.5	392.3	523				435.8	523
32					457.6	523				470.7	523
33				174.3	348.7	523			261.5	392.3	523
34				261.5	392.3	523			313.8	418.4	523
35				174.3	348.7	523			313.8	418.4	523
36				313.8	418.4	523			348.7	435.8	523
37			130.8	261.5	392.3	523			348.7	435.8	523
38				348.7	435.8	523			392.3	457.6	523
39		104.6	209.2	313.8	418.4	523			373.6	448.3	523
40				406.8	464.9	523			427.9	475.5	523
41			130.8	261.5	392.3	523		209.2	313.8	418.4	523
42			209.2	313.8	418.4	523		261.5	348.7	435.8	523
43			130.8	261.5	392.3	523		261.5	348.7	435.8	523
44			261.5	348.7	435.8	523		298.9	373.6	448.3	523
45		104.6	209.2	313.8	418.4	523		298.9	373.6	448.3	523
46			298.9	373.6	448.3	523		348.7	406.8	464.9	523
47	87.2	174.3	261.5	348.7	435.8	523		326.9	392.3	457.6	523
48			366.1	418.4	470.7	523		392.3	435.8	479.4	523
49					466	932				621.3	932
50					621.3	932				699	932
51					466	932				699	932
52					699	932				745.6	932
53				310.7	621.3	932				745.6	932
54					745.6	932				798.9	932
55			233	466	699	932				776.7	932
56					815.5	932				838.8	932
57				310.7	621.3	932			466	699	932
58				466	699	932			559.2	745.6	932
59				310.7	621.3	932			559.2	745.6	932
60				559.2	745.6	932			621.3	776.7	932
61			233	466	699	932			621.3	776.7	932
62				621.3	776.7	932			699	815.5	932
63		186.4	372.8	559.2	745.6	932			665.7	798.9	932
64				724.9	828.4	932			762.5	847.3	932
65			233	466	699	932		372.8	559.2	745.6	932
66			372.8	559.2	745.6	932		466	621.3	776.7	932
67			233	466	699	932		466	621.3	776.7	932
68			466	621.3	776.7	932		532.6	665.7	798.9	932
69		186.4	372.8	559.2	745.6	932		532.6	665.7	798.9	932
70			532.6	665.7	798.9	932		621.3	724.9	828.4	932
71	155.3	310.7	466	621.3	776.7	932		582.5	699	815.5	932
72			652.4	745.6	838.8	932		699	776.7	854.3	932

表 2 心理実験で用いた 144 個のトーンペアの音の周波数情報 (続く)

番号	音1の周波数成分 (Hz)					音2の周波数成分 (Hz)						
73					830.5	1661				1107.3	1661	
74					1107.3	1661				1245.8	1661	
75					830.5	1661				1245.8	1661	
76					1245.8	1661				1328.8	1661	
77				553.7	1107.3	1661				1328.8	1661	
78					1328.8	1661				1423.7	1661	
79			415.3	830.5	1245.8	1661				1384.2	1661	
80					1453.4	1661				1494.9	1661	
81				553.7	1107.3	1661			830.5	1245.8	1661	
82				830.5	1245.8	1661			996.6	1328.8	1661	
83				553.7	1107.3	1661			996.6	1328.8	1661	
84				996.6	1328.8	1661			1107.3	1384.2	1661	
85			415.3	830.5	1245.8	1661			1107.3	1384.2	1661	
86				1107.3	1384.2	1661			1245.8	1453.4	1661	
87		332.2	664.4	996.6	1328.8	1661			1186.4	1423.7	1661	
88				1291.9	1476.4	1661			1359	1510	1661	
89			415.3	830.5	1245.8	1661		664.4	996.6	1328.8	1661	
90			664.4	996.6	1328.8	1661		830.5	1107.3	1384.2	1661	
91			415.3	830.5	1245.8	1661		830.5	1107.3	1384.2	1661	
92			830.5	1107.3	1384.2	1661		949.1	1186.4	1423.7	1661	
93		332.2	664.4	996.6	1328.8	1661		949.1	1186.4	1423.7	1661	
94			949.1	1186.4	1423.7	1661		1107.3	1291.9	1476.4	1661	
95	276.8	553.7	830.5	1107.3	1384.2	1661		1038.1	1245.8	1453.4	1661	
96			1162.7	1328.8	1494.9	1661		1245.8	1384.2	1522.6	1661	
97					1480	2960				1973.3	2960	
98					1973.3	2960				2220	2960	
99					1480	2960				2220	2960	
100					2220	2960				2368	2960	
101				986.7	1973.3	2960				2368	2960	
102					2368	2960				2537.1	2960	
103			740	1480	2220	2960				2466.7	2960	
104					2590	2960				2664	2960	
105				986.7	1973.3	2960			1480	2220	2960	
106				1480	2220	2960			1776	2368	2960	
107				986.7	1973.3	2960			1776	2368	2960	
108				1776	2368	2960			1973.3	2466.7	2960	
109			740	1480	2220	2960			1973.3	2466.7	2960	
110				1973.3	2466.7	2960			2220	2590	2960	
111		592	1184	1776	2368	2960			2114.3	2537.1	2960	
112				2302.2	2631.1	2960			2421	2690.9	2960	
113			740	1480	2220	2960		1184	1776	2368	2960	
114			1184	1776	2368	2960		1480	1973.3	2466.7	2960	
115			740	1480	2220	2960		1480	1973.3	2466.7	2960	
116			1480	1973.3	2466.7	2960		1691.4	2114.3	2537.1	2960	
117		592	1184	1776	2368	2960		1691.4	2114.3	2537.1	2960	
118			1691.4	2114.3	2537.1	2960		1973.3	2302.2	2631.1	2960	
119	493.3	986.7	1480	1973.3	2466.7	2960		1850	2220	2590	2960	
120			2072	2368	2664	2960		2220	2466.7	2713.3	2960	
121					2637	5274				3516	5274	
122					3516	5274				3955.5	5274	
123					2637	5274				3955.5	5274	
124					3955.5	5274				4219.2	5274	
125				1758	3516	5274				4219.2	5274	
126					4219.2	5274				4520.6	5274	
127			1318.5	2637	3955.5	5274				4395	5274	
128					4614.8	5274				4746.6	5274	
129				1758	3516	5274			2637	3955.5	5274	
130				2637	3955.5	5274			3164.4	4219.2	5274	
131				1758	3516	5274			3164.4	4219.2	5274	
132					3164.4	4219.2	5274			3516	4395	5274
133			1318.5	2637	3955.5	5274				3516	4395	5274
134				3516	4395	5274			3955.5	4614.8	5274	
135		1054.8	2109.6	3164.4	4219.2	5274			3767.1	4520.6	5274	
136				4102	4688	5274			4315.1	4794.5	5274	
137			1318.5	2637	3955.5	5274		2109.6	3164.4	4219.2	5274	
138			2109.6	3164.4	4219.2	5274		2637	3516	4395	5274	
139			1318.5	2637	3955.5	5274		2637	3516	4395	5274	
140				2637	3516	4395	5274		3013.7	3767.1	4520.6	5274
141		1054.8	2109.6	3164.4	4219.2	5274		3013.7	3767.1	4520.6	5274	
142				3013.7	3767.1	4520.6	5274		3516	4102	4688	5274
143	879	1758		2637	3516	4395	5274		3296.3	3955.5	4614.8	5274
144				3691.8	4219.2	4746.6	5274		3955.5	4395	4834.5	5274

番号は、トーンペアを、低い周波数から高い周波数までの順に並べて割り振ったもの。実際の心理実験ではランダムに再生した。

黒い枠に示した第 97 番から第 144 番までは、高い周波数を持った 48 個トーンペア。周波数が高い音では、被験者を二つの群に分離しにくいことが報告されているため、この 48 個トーンペアを除き、インデックスを再計算した。

表 3 心理実験で用いた 144 個のトーンペアのピッチ認知データ

番号	Nf_0 (%)	Nf_{sp} (%)	$Nf_0 - Nf_{sp}$ (%)
24	0.04	0.106382979	-0.066382979
17	0.96	0.946808511	0.013191489
144	0.96	0.925531915	0.034468085
129	0.52	0.478723404	0.041276596
9	0.88	0.829787234	0.050212766
97	0.253333333	0.170212766	0.083120567
122	0.52	0.436170213	0.083829787
98	0.84	0.755319149	0.084680851
126	0.826666667	0.734042553	0.092624113
121	0.173333333	0.074468085	0.098865248
141	0.706666667	0.606382979	0.100283688
100	0.866666667	0.765957447	0.10070922
8	0.186666667	0.085106383	0.101560284
124	0.826666667	0.723404255	0.103262411
108	0.8	0.691489362	0.108510638
133	0.666666667	0.553191489	0.113475177
135	0.666666667	0.553191489	0.113475177
139	0.826666667	0.712765957	0.113900709
138	0.946666667	0.829787234	0.116879433
21	0.48	0.361702128	0.118297872
131	0.666666667	0.542553191	0.124113475
130	0.84	0.712765957	0.127234043
128	0.946666667	0.819148936	0.12751773
140	0.853333333	0.723404255	0.129929078
132	0.92	0.787234043	0.132765957
123	0.346666667	0.212765957	0.133900709
102	0.906666667	0.765957447	0.14070922
127	0.546666667	0.404255319	0.142411348
16	0.413333333	0.265957447	0.147375887
99	0.506666667	0.35106383	0.155602837
134	0.853333333	0.691489362	0.161843972
14	0.706666667	0.542553191	0.164113475
142	0.866666667	0.70212766	0.164539007
120	0.973333333	0.808510638	0.164822695
18	0.88	0.712765957	0.167234043
7	0.2	0.031914894	0.168085106
5	0.213333333	0.042553191	0.170780142
12	0.866666667	0.691489362	0.175177305
104	0.92	0.744680851	0.175319149
116	0.92	0.744680851	0.175319149
107	0.48	0.29787234	0.18212766
19	0.72	0.531914894	0.188085106
136	0.88	0.691489362	0.188510638
110	0.946666667	0.755319149	0.191347518
112	0.906666667	0.712765957	0.193900709
114	0.88	0.670212766	0.209787234
125	0.573333333	0.361702128	0.211631206
32	0.373333333	0.159574468	0.213758865
101	0.733333333	0.510638298	0.222695035
143	0.773333333	0.542553191	0.230780142
22	0.533333333	0.29787234	0.235460993
118	0.973333333	0.734042553	0.23929078
3	0.333333333	0.085106383	0.24822695
103	0.76	0.510638298	0.249361702
115	0.72	0.468085106	0.251914894
42	0.946666667	0.691489362	0.255177305
119	0.706666667	0.446808511	0.259858156
23	0.666666667	0.404255319	0.262411348
105	0.666666667	0.404255319	0.262411348
20	0.72	0.457446809	0.262553191
49	0.32	0.053191489	0.266808511
111	0.653333333	0.382978723	0.27035461
113	0.92	0.64893617	0.27106383
10	0.96	0.680851064	0.279148936
13	0.44	0.159574468	0.280425532
96	0.893333333	0.606382979	0.286950355
56	0.493333333	0.20212766	0.291205674
6	0.506666667	0.212765957	0.293900709
44	0.933333333	0.638297872	0.295035461
137	0.733333333	0.436170213	0.297163121
109	0.72	0.414893617	0.305106383

表 4 心理実験で用いた 144 個のトーンペアのピッチ認知データ (続く)

番号	Nf_0 (%)	Nf_{sp} (%)	$Nf_0 - Nf_{sp}$ (%)
86	0.933333333	0.627659574	0.305673759
15	0.48	0.159574468	0.320425532
106	0.906666667	0.585106383	0.321560284
79	0.48	0.14893617	0.33106383
31	0.386666667	0.053191489	0.333475177
1	0.52	0.180851064	0.339148936
117	0.88	0.531914894	0.348085106
41	0.933333333	0.585106383	0.34822695
83	0.48	0.127659574	0.352340426
92	0.813333333	0.457446809	0.355886525
2	0.773333333	0.414893617	0.358439716
4	0.613333333	0.244680851	0.368652482
28	0.773333333	0.404255319	0.369078014
30	0.52	0.14893617	0.37106383
52	0.786666667	0.393617021	0.393049645
72	0.893333333	0.5	0.393333333
74	0.8	0.404255319	0.395744681
90	0.8	0.404255319	0.395744681
80	0.8	0.393617021	0.406382979
40	0.653333333	0.234042553	0.41929078
36	0.92	0.5	0.42
73	0.8	0.372340426	0.427659574
53	0.44	0.010638298	0.429361702
11	0.72	0.287234043	0.432765957
55	0.466666667	0.021276596	0.445390071
64	0.693333333	0.244680851	0.448652482
34	0.933333333	0.478723404	0.454609929
75	0.52	0.063829787	0.456170213
62	0.96	0.5	0.46
33	0.92	0.457446809	0.462553191
81	0.813333333	0.340425532	0.472907801
37	0.586666667	0.106382979	0.480283688
66	0.92	0.436170213	0.483829787
70	0.92	0.436170213	0.483829787
57	0.6	0.106382979	0.493617021
38	0.773333333	0.276595745	0.496737589
47	0.706666667	0.20212766	0.504539007
94	0.946666667	0.436170213	0.510496454
89	0.853333333	0.340425532	0.512907801
77	0.653333333	0.138297872	0.515035461
76	0.893333333	0.372340426	0.520992908
65	0.933333333	0.393617021	0.539716312
29	0.68	0.138297872	0.541702128
48	0.813333333	0.265957447	0.547375887
88	0.866666667	0.319148936	0.54751773
68	0.773333333	0.223404255	0.549929078
82	0.88	0.329787234	0.550212766
50	0.8	0.244680851	0.555319149
35	0.693333333	0.127659574	0.565673759
51	0.866666667	0.29787234	0.568794326
84	0.92	0.35106383	0.56893617
46	0.84	0.265957447	0.574042553
60	0.906666667	0.329787234	0.576879433
58	0.96	0.372340426	0.587659574
54	0.813333333	0.223404255	0.589929078
95	0.933333333	0.340425532	0.592907801
78	0.813333333	0.212765957	0.600567376
43	0.88	0.276595745	0.603404255
25	0.8	0.191489362	0.608510638
45	0.853333333	0.244680851	0.608652482
39	0.733333333	0.117021277	0.616312057
93	0.853333333	0.234042553	0.61929078
27	0.826666667	0.20212766	0.624539007
91	0.84	0.212765957	0.627234043
26	0.786666667	0.14893617	0.637730496
59	0.826666667	0.180851064	0.645815603
87	0.693333333	0.031914894	0.66141844
61	0.893333333	0.223404255	0.669929078
67	0.946666667	0.265957447	0.68070922
71	0.853333333	0.159574468	0.693758865
85	0.84	0.127659574	0.712340426
69	0.92	0.180851064	0.739148936
63	0.946666667	0.14893617	0.797730496

表 3 と表 4 の番号は、表 1 と表 2 の番号と対応している。

Nf_0 、ファンダメンタルの認知能力を有する群の中のピッチで判断した人数の割合。

Nf_{sp} 、ハーモニクス成分の認知能力を有する群の中のピッチで判断した人数の割合。

$Nf_0 - Nf_{sp}$ 、割合の間の差。

表 3 と表 4 は、 $Nf_0 - Nf_{sp}$ の昇順で配列した。

脳磁図実験には、 $Nf_0 - Nf_{sp}$ 、割合の間の差が最大である 63 番のトーンペアを用いた。

表 5 実験へ参加した被験者の情報

被験者	タイプ	人数	男性/女性	年齢		インデックス	
				範囲	平均 \pm SD	範囲	平均 \pm SD
Selected	f ₀	34	19/15	20 ~ 28	21.38 \pm 1.63	-0.92 ~ -0.52	-0.70 \pm 0.13
	f _{sp}	30	17/13	20 ~ 23	20.77 \pm 0.96	0.52 ~ 0.79	0.64 \pm 0.07
MEG	f ₀	16	10/6	20 ~ 24	21.00 \pm 1.17	-0.90 ~ -0.54	-0.71 \pm 0.11
	f _{sp}	16	9/7	20 ~ 23	20.81 \pm 0.88	0.50 ~ 0.79	0.62 \pm 0.08
Analyzed	f ₀	9	3/6	20 ~ 21	20.44 \pm 0.69	-0.90 ~ -0.54	-0.73 \pm 0.12
	f _{sp}	9	3/6	20 ~ 23	21.00 \pm 0.94	0.56 ~ 0.73	0.62 \pm 0.07

Selected、心理実験より選んだファンダメンタルの認知能力が強い被験者とハーモニクス成分の認知能力が強い被験者。

MEG、脳磁図実験へ参加した被験者。

Analyzed、脳磁図実験で覚醒状態が良かった被験者。

表 6 ファンダメンタルの認知能力が強い被験者群の N100m 信号源位置

被験者	左半球	右半球
1	PT	IHG
2	PT	PT
3	mHG	IHG
4	PT	PT
5	IHG	mHG
6	IHG	IHG
7	PT	mHG
8	PT	PT
9	PT	mHG

左半球では PT に 6 名、mHG に 1 名、IHG に 2 名推定され、右半球では PT に 2 名、mHG に 3 名、IHG に 3 名推定された。

PT, planum temporal.

IHG, lateral Heschl's gyrus

mHG, mesial Heschl' gyrus.

表 7 ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者群の N100m 信号源位置

被験者	左半球	右半球
1	mHG	mHG
2	PT	PT
3	mHG	mHG
4	mHG	PT
5	mHG	PT
6	mHG	PT
7	PT	PT
8	lHG	lHG
9	PT	PT

左半球では PT に 3 名、mHG に 5 名、lHG に 1 名推定され、右半球では PT に 6 名、mHG に 2 名、lHG に 1 名推定された。

PT, planum temporal.

lHG, lateral Heschl's gyrus

mHG, mesial Heschl' gyrus.

表 8 ファンダメンタルの認知能力が強い被験者群の N100m の強度 (nA・m)

統計	左半球	右半球	左右半球の差分	δ_f
	27.10	40.20	-13.10	-0.19
	24.15	31.04	-6.89	-0.12
	14.37	63.21	-48.84	-0.63
	60.43	114.98	-54.55	-0.31
	46.06	61.25	-15.19	-0.14
	25.18	52.81	-27.63	-0.35
	32.19	66.86	-34.67	-0.35
	36.81	63.07	-26.26	-0.26
	32.63	89.82	-57.19	-0.47
標本数	9	9	9	9
平均	33.21	64.80	-31.59	-0.32
標準偏差	12.73	23.70	17.49	0.15

表 9 ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者群の N100m の強度(nA・m)

統計	左半球	右半球	左右半球の差分	δ_f
	41.57	41.40	0.17	0.00
	37.21	26.73	10.48	0.16
	50.39	39.80	10.59	0.12
	41.97	21.21	20.76	0.33
	47.95	37.25	10.7	0.13
	57.44	24.07	33.37	0.41
	68.03	42.21	25.82	0.23
	45.70	27.46	18.24	0.25
	49.22	31.77	17.45	0.22
標本数	9	9	9	9
平均	48.83	32.43	16.40	0.21
標準偏差	8.76	7.50	9.22	0.11

表 10 インデックスと音楽経験年数（1）

ファンダメンタルの認知能力が強い被験者群	
δ_f	音楽経験の年数(楽器できる)
-0.19	17
-0.12	3
-0.63	7
-0.31	5
-0.14	6
-0.35	16
-0.35	0
-0.26	0
-0.47	0

表 11 インデックスと音楽経験年数（2）

ハーモニクス成分の認知能力が強い被験者群	
δ_f	音楽経験の年数(楽器できる)
0.00	10
0.16	5
0.12	13
0.33	13
0.13	6
0.41	7
0.23	3
0.25	5
0.22	0